

Neutrones para iluminar la intimidad de la materia

Ellen Gleditsch, la olvidada
pionera noruega en la
investigación sobre la
radiactividad

Fases 1 y 2 del proyecto
HYMERES sobre
experimentos de contención
para seguridad de reactores

María Teresa Macías,
presidenta de la SEPR:
“El uso de radiaciones
ionizantes debe cumplir
el criterio de justificación”



De congresos sin salir de casa

El Consejo de Seguridad Nuclear dispone de un expositor virtual para ferias y congresos online. El diseño de la planta tiene forma de átomo, con el logotipo del CSN en el núcleo, y cuatro salas diferenciadas.

Este expositor virtual permite la realización de una visita interactiva en formato de imágenes 360° en 3D y es navegable desde diferentes dispositivos (ordenadores, tabletas y teléfonos móviles). En él se puede encontrar digitalizada toda la información que habitualmente muestra el CSN en los congresos, sustituyendo las imágenes de lonetas por infografías en las paredes de las salas virtuales. Además, contiene nuevos videos de carácter pedagógico que pueden ser visualizados dentro del mismo.

Acompáñenos en <https://standvirtual.csn.es/>

Lazos iberoamericanos

Tras el accidente de la central nuclear de Chernóbil, los organismos reguladores radiológicos y nucleares empezaron a crear asociaciones para el intercambio de información y experiencias, principalmente en el área de la seguridad nuclear. Una de las instituciones pioneras en este ámbito fue el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, conocido como el FORO, nacido el 9 de julio de 1997 en Veracruz (México) y que ha celebrado, este verano en Madrid, sus primeros 25 años de vida. En este nuevo número de *Alfa* contamos el recorrido de esta asociación —compuesta por once países—, los quince proyectos técnicos que ha desarrollado en estos años y los siete que actualmente está desarrollando, así como sus objetivos de futuro.

Nos acercamos también a la Fuente Europea de Neutrones por Espalación que está construyéndose en Suecia. Esta instalación será la más potente del mundo en generación de neutrones; un lugar de investigación multidisciplinar de última generación que permitirá a los científicos mirar en el interior de la materia con gran nivel de detalle.

Entre los reportajes del número 51 de *Alfa* incluimos un análisis sobre la covid persistente, un fenómeno que ha sorprendido a los profesionales de la medicina y para el que se busca explicación y

tratamientos adecuados con el fin de eliminar la enfermedad definitivamente. Además, abordamos la nueva definición del kilogramo a partir de la constante de Planck en el Sistema Internacional de Medidas. El kilogramo era la última magnitud que aún se definía con un patrón físico, un modelo que se conserva en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas situada cerca de París.

El Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, una de las asociaciones internacionales pioneras del sector, cumple 25 años

Recordamos a Ellen Gleditsch, química noruega pionera en la investigación sobre la radiactividad y que trabajó en el laboratorio con Marie Curie, cuya figura había caído en el olvido incluso en su propio país. También hacemos un recorrido sobre cómo el cine y la televisión han utilizado la energía nuclear para dar sentido científico a poderes extraordinarios como los que ostentan Godzilla,

Hulk o Spiderman, o han imaginado catastróficas situaciones de accidentes o guerras nucleares.

María Teresa Macías, presidenta de la Sociedad Española de Protección Radiológica, protagoniza las páginas de la *Entrevista*, donde reflexiona sobre el uso de las radiaciones ionizantes y el principio básico de justificación que debe primar en todas sus aplicaciones. En la *Radiografía*, explicamos cómo se clasifican los sucesos en instalaciones nucleares y radiactivas utilizando la Escala INES.

La sección más técnica de *Alfa* incluye los resultados del proyecto HYMERES, puesto en marcha por la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE y en el que ha participado el Consejo de Seguridad Nuclear. En este proyecto, se busca determinar el riesgo de que se produzcan combustiones de hidrógeno en accidentes con fusión del núcleo. Las conclusiones de los trabajos han permitido analizar la distribución de gases en la atmósfera de contención.

Además, explicamos la Instrucción Técnica Complementaria que ha aprobado el CSN sobre los requisitos de protección radiológica que deben cumplir tanto los sistemas de seguridad de los búnkeres en los que se llevan a cabo las operaciones de radiografía y gammagrafía industrial fija, como los procedimientos de trabajo de esas actividades. 

ALFA

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 51
Septiembre 2022



Comité Editorial

Juan Carlos Lentijo Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Elvira Romera Gutiérrez
Teresa Vázquez Mateo
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. Trabajo del Camino
24010 León

Fotografía de portada

Ulrika Hammarlund-ESS

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

© Consejo de Seguridad Nuclear

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

REPORTAJES

6 El paraíso de los neutrones



En 2027, entrará en funcionamiento la instalación generadora de neutrones más potente del mundo. Se trata de la Fuente Europea de Neutrones por Espalación (ESS), que está construyéndose en Lund, Suecia; un centro de investigación multidisciplinar de última generación que permitirá asomarse al interior de la materia con gran detalle.

12 El FORO Iberoamericano cumple 25 años

En 1997, un reducido número de reguladores radiológicos y nucleares de países iberoamericanos decidieron crear una de las primeras asociaciones en ese ámbito para intercambiar información, compartir experiencias y realizar proyectos de I+D de interés común. Un cuarto de siglo después, el FORO se ha convertido en una referencia internacional.



33 La pandemia eterna

Aunque el número de infecciones por covid-19 y la gravedad de los afectados se ha reducido significativamente, un porcentaje elevado de pacientes sigue padeciendo secuelas y síntomas graves. Es lo que se denomina covid persistente. La ciencia busca una explicación y una forma de atacar el problema.

39 La importancia del tamaño

En 2019 entró en vigor la nueva definición de una de las siete magnitudes básicas del Sistema Internacional de Medidas, el kilogramo, la unidad de masa. Se trata de la última magnitud que aún se definía con un patrón físico, un modelo. La nueva definición depende de una constante de la naturaleza, la que lleva el nombre de Max Planck.



52 Monstruos, apocalipsis y licencias poéticas

Desde mediados del siglo XX, el cine y la televisión han utilizado la energía nuclear para dar sentido científico a fenómenos extraordinarios, como amenazas de destrucción masiva por una guerra nuclear, accidentes catastróficos y superhéroes dotados de poderes deslumbrante tras sufrir los efectos de la radiación.

CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

58 Margarita Ellen Gleditsch, pionera en la investigación sobre la radiactividad

Esta química noruega, olvidada durante decenios incluso en su país, trabajó en el laboratorio de Marie Curie, de la que fue asistente personal. Entre otras cosas, contribuyó a la demostración de la existencia de isótopos, calculó la relación radio-uranio en minerales y refutó la idea de que el litio se producía a partir de cobre irradiado.

RADIOGRAFÍA

26 La Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES)

Para comunicar al público de manera rápida y coherente la importancia que, desde el punto de vista de la seguridad, tienen los sucesos asociados a las instalaciones nucleares y el uso de fuentes de radiación, se utiliza la escala INES, que permite obtener una evaluación inmediata de un solo vistazo.



ENTREVISTA

28 María Teresa Macías, presidenta de la Sociedad Española de Protección Radiológica

“Cualquier trabajo con radiaciones ionizantes debe estar sometido al principio básico de la justificación”

ARTÍCULOS TÉCNICOS

18 Fases 1 y 2 del proyecto HYMERES de la OECD/NEA sobre experimentos de contención para seguridad de reactores

Para determinar el riesgo de que se produzcan combustiones de hidrógeno en accidentes con fusión del núcleo la OECD/NEA puso en marcha el proyecto HYMERES. El CSN ha participado en sus dos fases, lo que le ha permitido acceder a los últimos resultados experimentales de distribución de gases en la atmósfera de contención.

44 Plan del CSN para mejorar los sistemas de seguridad de los recintos de operación de radiografía y gammagrafía industrial

Una adecuada protección radiológica en las operaciones de radiografía y gammagrafía industrial fija (en búnker) requiere buenos procedimientos de trabajo y que el diseño del búnker incorpore un sistema de seguridad adecuado. El CSN ha aprobado una Instrucción Técnica Complementaria definiendo los



JULIO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ



63 Reacción en cadena

67 Panorama

69 Acuerdos del Pleno

70 Publicaciones

71 Abstracts

Vista aérea de la ESS en febrero de 2022.



El proyecto internacional ESS permitirá penetrar en la intimidad de la materia

El paraíso de los neutrones

La Fuente Europea de Neutrones por Espalación (ESS) que está construyéndose en Lund, Suecia, será la fuente de estas partículas más potente del mundo; una instalación de investigación multidisciplinar de última generación que permitirá a los científicos mirar en el interior de la materia con gran nivel de detalle. La ESS, de la que forman parte trece países europeos, entre ellos España, producirá neutrones libres con fines científicos mediante un proceso denominado espalación. Los neutrones son una herramienta muy útil para revelar la estructura y la función de la materia (desde la

escala microscópica hasta la atómica) y su dinámica interna, pudiéndose emplear en casi todos los ámbitos de la ciencia: física, química, geología, biología, medicina, ingeniería, ciencia de materiales, arqueología e historia del arte. El conocimiento básico que salga de la ESS, que prevé entrar en funcionamiento a finales de 2027, podrá utilizarse en medio ambiente, medicina, conservación del patrimonio y para el desarrollo de nuevos materiales para ser utilizados en ámbitos como la energía y las tecnologías de la información.

■ Texto: **Eugenia Angulo Alonso** | Periodista de ciencia ■



PERRY NORDING-ESS



James Chadwick, descubridor del neutrón.

y complejas en la historia de la ciencia: la estructura del átomo, la esencia de la materia. En 1935, Chadwick recibió el premio Nobel de física por su descubrimiento.

Diez años después de la publicación de los artículos de Chadwick, el 2 de diciembre de 1942, los físicos Enrico Fermi y Leó Szilárd llevaron a cabo en la Universidad de Chicago la primera reacción de fisión nuclear en cadena de forma controlada. En estas reacciones se produce una lluvia de neutrones de alta energía que, a su vez, vuelven a iniciar la reacción de fisión liberando más neutrones y así sucesivamente. A partir de aquel frío invierno, las partículas quedaron intrínsecamente ligadas a la tecnología de la fisión nuclear, que vive en la ambivalencia de ser a la vez imprescindible y terrible para la humanidad: con ella se genera electricidad en las centrales nucleares; a ella se debe la capacidad de destrucción del armamento nuclear que vuelve a tener en vilo al mundo.

Sin embargo, en la década de los 60, la especial naturaleza de los neutrones

les permitió comenzar una nueva vida con la construcción de las primeras fuentes de neutrones con fines puramente científicos, no de producción de energía ni fabricación de armamento militar. De masa parecida a la del protón, los neutrones tienen la peculiaridad de carecer de carga eléctrica por lo que pueden atravesar imperturbables las fuerzas eléctricas que rodean a los núcleos y penetrar en la materia, revelando los detalles más íntimos de su interior sin dañarla. Las fuentes de neutrones, como la ESS que está construyéndose en Lund, generan haces de estas partículas que funcionan de

forma parecida a las radiografías, pero, en lugar de iluminar con rayos X, corrientes formadas por millones y millones de neutrones revelan la intimidad del ala de un avión, la batería de un móvil, una proteína de un virus, o el silencio de una cerámica antigua. Por las dimensiones y la complejidad de estas instalaciones, vendrían a ser una especie de microscopios gigantes.

Una lámpara de neutrones

La historia de las fuentes de neutrones es intensamente política -el propio Chadwick pasó la Primera Guerra Mundial en un campo de concentración cerca de Berlín acusado de espionaje-. En la década de los 60, Estados Unidos, Rusia y Europa luchaban por liderar el desarrollo tecnológico que tan decisivo había sido en las guerras mundiales previas. En 1966, los estadounidenses inauguraron el reactor nuclear de investigación HFIR (High Flux Isotope Reactor) en el Oak Ridge National Laboratory, en Tennessee (EE.UU.), creado como parte del proyecto Manhattan bajo el trabajo de los

El 27 de febrero de 1932, la revista *Nature* publicó una carta firmada por James Chadwick, un físico inglés de 41 años que trabajaba con Ernest Rutherford en el Cavendish Laboratory de la Universidad de Cambridge. El título transmitía una cierta incertidumbre en la mente del autor: "Possible Existence of a Neutron". Pocos meses después, en junio de ese mismo año, Chadwick publicó otro artículo en el que parece despojado ya de las nubes de la duda. En "The existence of a neutron", el físico demostraba la existencia de esta partícula básica, que junto a protones y electrones componen el átomo. Con este descubrimiento concluía, al menos hasta ese momento, una de las búsquedas más largas

científicos Clifford Shull y Ernest Wollan. De forma simultánea, Bertram Brockhouse en el Laboratorio Nuclear de Chalk River, en Ontario, Canadá, trabaja en experimentos de neutrones similares. Shull, Wollan y Brockhouse descubrieron la capacidad de producir imágenes de las estructuras moleculares sobre las que se hacían incidir estos haces de neutrones. Se trataba de una nueva forma de explorar los materiales y sus cualidades que no podían ser conseguidas con otros métodos, una “lámpara de neutrones”, por la que Shull y Brockhouse recibieron el premio Nobel de Física.

Un año después de la inauguración del HFIR, en 1967, el canciller Adenauer y el general De Gaulle firmaron un acuerdo de colaboración científica con el propósito de evitar futuros conflictos bélicos entre Alemania y Francia. Incluía la construcción de una fuente europea de neutrones que compitiera con la estadounidense. Dos años después comenzó a construirse el Instituto Laue-Langevin conocido habitualmente como ILL, en Grenoble, Francia, que pronto, en 1971, comenzó a producir sus primeros neutrones. Tanto el ILL, con el que España

comenzó a colaborar en 1987, como el HFIR son reactores nucleares de fisión para investigación, el primero opera a 58 megavattios y el segundo a 85 megavattios -los reactores nucleares comerciales que generan energía son mucho más potentes-. Para producir una fuente de neutrones más brillante y potente que no llevara el pesado bagaje de los reactores de fisión, los científicos siguieron buscando otras formas de generar los preciados neutrones.

Así, en 1985 entró en funcionamiento ISIS, en Oxfordshire, Inglaterra, el primer acelerador lineal de protones para producir neutrones en un proceso llamado espalación, más potente, que se extendió rápidamente por el mundo. Japón construyó un reactor de neutrones de menores prestaciones, el JAERI, y la fuente de neutrones por espalación J-PARC. En 2006, el Oak Ridge Laboratory de EE. UU. inauguró otra fuente de neutrones, el Spallation Neutron Source, con veinte instrumentos.

Parte del equipo e instalaciones del ESS Bilbao.



Para mantener el liderazgo, Europa decidió la construcción de la fuente de espalación más ambiciosa y amplia del mundo, la Fuente Europea de Neutrones por Espalación, o ESS. Trece países de Europa participan en el ambicioso proyecto de 1.843 millones de euros, entre ellos Suecia y Dinamarca como anfitriones, y también España, Alemania, Francia y Hungría. Tras un largo camino que comenzó a principios de la década de los 90, en mayo de 2009 se anunció la selección del emplazamiento en Lund, Suecia, con el apoyo negociado de las candidaturas española, que había propuesto la ciudad de Bilbao para acoger la instalación, y Hungría, que había ofrecido Debrecen. Después de un arduo camino de más de veinte años, la ESS comenzó a construirse en 2014 y generará haces de neutrones 100 veces más brillantes que

España en la ESS

ESS Bilbao es un centro de excelencia en ciencia y tecnología de aceleradores de partículas y ciencias neutrónicas con sede en Zamudio, cerca de Bilbao. Se trata de un consorcio público formado por los gobiernos de España y del País Vasco, que concentra la contribución española en especie a la ESS. Tiene una plantilla cercana a los 50 trabajadores, en su mayoría físicos e ingenieros.

“La contribución española a ESS alcanza unos cincuenta millones de euros y abarca las distintas partes de la instalación europea. El total de la contribución realizada hasta la fecha es de unos 26 millones, correspondiente a las partes del acelerador y el blanco o *target*”, explica Mario Pérez, director ejecutivo de ESS Bilbao. En concreto, el centro se ha encargado del diseño y fabricación de varias partes del acelerador de

partículas, del blanco o *target* y del instrumento de investigación Miracles.

El acelerador tiene la misión de acelerar protones a velocidades altísimas que impacten contra el blanco. ESS Bilbao se ha encargado del diseño y fabricación de varias de sus partes: el llamado MEBT, o transporte de haz a media energía, una sección dentro del acelerador que sirve para acondicionar y hacer el diagnóstico del haz de protones, y del sistema de radiofrecuencia (RF), que convierte y amplifica la potencia necesaria para acelerar correctamente las partículas a velocidades cercanas a la luz.

En cuanto al sistema del *target* o blanco, que es el corazón de la instalación, Pérez explica que “está formado por la unidad motora, el sello rotatorio, el eje y la rueda. Aquí es donde los haces de protones acelerados chocan con un material pesado, tungsteno, que se encuentra dentro de la rueda, y donde salen

los que ya existen. “En términos sencillos, la diferencia entre las fuentes de neutrones actuales y el ESS es algo así como la diferencia entre hacer una foto al resplandor de una vela o utilizar una linterna”, explica la web de la ESS, que se prevé que entre en funcionamiento a finales de 2027.

Esta especial mirada de los neutrones al interior de la materia, tan diversa y compleja como el motor de un coche en funcionamiento o la soledad de una tumba egipcia, ayudará, según la ESS, a “diseñar nuevos materiales que podrían dar lugar a mejores baterías o materiales de ingeniería más resistentes, o ayudar a los investigadores de ciencias de la vida a desarrollar nuevas vacunas o medicamentos más eficaces. Con la ayuda de los neutrones, los científicos podrán comprender los materiales y la materia a un nivel más profundo que nunca. Prevemos que hasta 3.000 investigadores de todo el mundo acudirán aquí cada año para realizar experimentos. Con el tiempo, muchos de ellos conducirán a una ciencia nueva y transformadora en los campos de las ciencias de la vida, la ingeniería, la investigación energética, los materiales



JOHAN KNOBE-ESS

Vista general del edificio principal de la ESS.

y muchos más. La ESS hará avanzar la ciencia para que las generaciones futuras puedan prosperar.”

Son objetivos ambiciosos. Para ello, la instalación contará con quince instrumentos desarrollados y construidos por equipos científicos y tecnológicos de toda Europa. España participa en esta especial fuente de neutrones a través del

Centro de Tecnologías Neutrónicas ESS-Bilbao, un consorcio público de los gobiernos central y vasco que concentra las contribuciones en especie españolas. ESS Bilbao se encarga del diseño y fabricación de distintas partes del acelerador, de varios elementos del corazón de la instalación, el llamado blanco o target, y del instrumento Miracles, que

los neutrones que sirven para realizar los experimentos científicos”. Es un componente de avanzada tecnología, formado por un potente motor, un eje de más de siete metros de longitud y una rueda de dos metros y medio de diámetro sobre la cual chocan los protones acelerados. Esta rueda, que pesa unas cinco toneladas y gira a más de 20 revoluciones por minuto, contiene en su interior 7.000 ladrillos de tungsteno refrigerados por helio.

El blanco se encuentra dentro de una enorme vasija también fabricada por el consorcio español -a la que llaman monolith vessel o monolito del blanco- técnicamente muy compleja de fabricar y en muchos aspectos similar a la vasija de un reactor nuclear. Alberga en su interior todo el sistema del target, y permite confinar la atmosfera del mismo, incluido el vacío y la radiación. Dentro de este monolito del blanco, también se ha encargado de fabricar varios sistemas de ventanas que “permiten tanto mantener atmosferas diferentes entre acelerador y target,

como albergar instrumentación para la medición del haz de protones antes de impactar”, explica Pérez.

“De estos paquetes de trabajo, hasta la fecha ESS Bilbao ha entregado prácticamente todo lo comprometido en la parte del acelerador, el MEBT y los sistemas de radiofrecuencia, lo que supone una contribución de alrededor de quince millones de euros. Respecto a los paquetes de trabajo de la parte de target, la gran mayoría ha sido entregado, y la suma asciende a unos once millones”, resume el investigador.

De los quince instrumentos que tendrá la ESS, el consorcio de Bilbao se ha encargado del diseño, fabricación, ensamblaje, entrega, instalación y puesta a punto de Miracles, con el que “se podrán realizar ensayos para hacer ciencia de polímeros, energía, nuevos materiales y ayudará en el desarrollo de nuevos medicamentos para el tratamiento de enfermedades como el cáncer, el parkinson o el alzheimer”, concluye Pérez. ▶

realizará estudios de polímeros y materias blandas condensadas.

El viaje del neutrón

Helmut Schobel, físico alemán, es el director general de la ESS desde mayo de 2021. Con motivo de la celebración del 31 aniversario de la colaboración entre el Instituto Laue-Langevin, que previamente dirigió, Schobel utiliza una metáfora para explicar lo que ocurre cuando se hace incidir un chorro de neutrones sobre un material: “Digamos que los neutrones viajan por una autopista y cuando pones tu muestra en el haz, en la autopista, las direcciones y la velocidad de los neutrones cambian: rebotan contra los núcleos y van más lentos o se aceleran. Entonces medimos la desviación del neutrón en términos de dirección y de velocidad”.

Podría interpretarse como un viaje en el que el neutrón acumula información de todo lo que ve a lo largo de su trayectoria por las capas de miles de millones de átomos que forman un material. “La dirección en la que se dispersará está determinada por todo lo que ha experimentado, por cada una de las interacciones con las partículas que se ha encontrado en la autopista. Así, obtenemos información no sobre partículas individuales, sino sobre el conjunto del material”, dice Schober. Los neutrones pueden detectar pequeñas estructuras de hasta milmillonésimas de metro, pero también cambios rapidísimos, de milmillonésimas de segundo, que ocurren en su interior; es decir, la dinámica del material: ver dónde están los átomos y qué están haciendo. Por esta facilidad de penetrar en la materia se pueden utilizar para estudiar muestras de materiales en condiciones extremas, como temperaturas o presiones muy elevadas, de gran utilidad, por ejemplo, en estudios geofísicos de predicción de terremotos. Y también, dada su neutralidad eléctrica, se pueden utilizar para

estudiar el comportamiento magnético de materiales que forman parte de componentes clave de nuestra vida como ordenadores, coches, móviles...

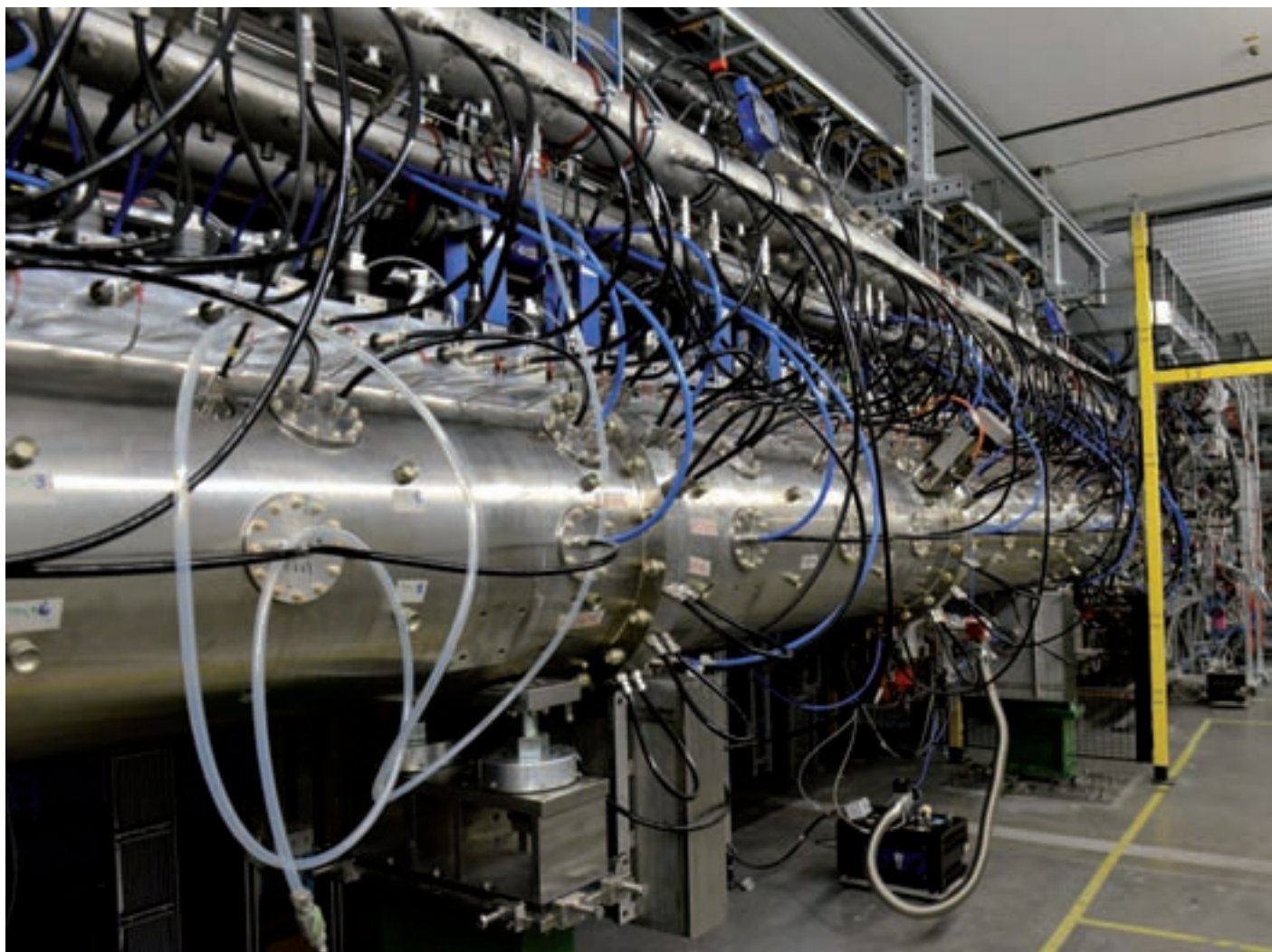
“Los neutrones que queremos usar tratan de tener al menos un protón, o varios, como compañeros. Se sienten extremadamente cómodos en un núcleo. Para aislarlos debes liberarlos de este agarre lo que requiere esfuerzo, energía: o tienes un núcleo cerca de la inestabilidad, como el uranio 235, y lo separas mediante el proceso de fisión y produces neutrones, o usas una partícula altamente energética como un protón, la aceleras a altas energías, la disparas contra un núcleo y liberas neutrones. Es lo que se llama proceso de espalación”, explica Schobel. Los protones acelerados llegan a alcanzar el 96 % de la velocidad de la luz, o lo que es lo mismo, podrían dar la vuelta a la Tierra en décimas de segundo. La ESS de Lund se basa en este concepto de espalación o astillado.



Arriba, interior de cobre de un componente del acelerador. Abajo, Helmut Schober, director de la ESS.

El corazón de la ESS

En concreto, la instalación está formada por un acelerador lineal de partículas, un blanco o *target* de metal pesado (en este caso, tungsteno), que ya ha terminado de fabricar el centro de tecnologías neutrónicas ESS-Bilbao, y un centro de datos y software situado en la Universidad de Copenhague. De forma un tanto esquemática, su funcionamiento es el siguiente: se calienta con campos electromagnéticos una fuente de iones llena de gas de hidrógeno. En estas condiciones, los electrones se desprendan de las moléculas del gas y dejan libres a los protones que posteriormente se aceleran con la



Vista de un tramo del acelerador lineal de protones del ESS.

ayuda de campos electromagnéticos adicionales en un acelerador lineal subterráneo de seiscientos metros de longitud. Los protones corren desbocados por el acelerador a casi la velocidad de la luz y, al llegar al blanco giratorio, chocan violentamente contra él.

El blanco, corazón de la ESS, es una rueda formada por 7.000 minúsculos ladrillos reflectantes de tungsteno. Como los choques contra la rueda son tan fuertes, consiguen separar los neutrones de los núcleos de tungsteno, de ahí el nombre de espalación o *astillado* del proceso, en una proporción de unos veinte o treinta neutrones por cada protón. Cuantos más neutrones se produzcan en la colisión contra el blanco, más "brillante"

serán los haces de neutrones que se produzcan. Por sus especiales características, la ESS será hasta 100 veces más brillante que otras fuentes de espalación existentes.

Los neutrones liberados son demasiado rápidos y energéticos para ser utilizados directamente en experimentos, así que lo siguiente es desacelerarlos hasta aproximadamente la velocidad del sonido haciéndoles pasar a través de moderadores llenos de agua o hidrógeno líquido. Tras este *frenado*, las corrientes de neutrones ya pueden dirigirse a través de líneas de haz a los distintos instrumentos especializados en áreas concretas: biomedicina, ciencia de materiales, ingeniería, arte...

Las aplicaciones de este ingenio son muchísimas. En los más de cincuenta años de funcionamiento del ILL se han llevado a cabo experimentos tan diversos como el análisis de fármacos para bloquear una enzima responsable de la maduración del VIH; estudiado células de iones de litio de coches eléctricos; medido el efecto de contaminantes, como nanopartículas de carbono en los pulmones; revelado ciertos mecanismos físicos del Alzheimer... En ISIS se estudiaron los materiales de las alas del gigante aéreo A-380. Cuando se concluya, la ESS contará con quince estaciones experimentales que podrán ampliarse hasta 22, y posiblemente más en el futuro.





Acto especial por el 25 aniversario en la reunión celebrada en julio en Madrid.

Historia de una colaboración regional convertida en referencia mundial

El FORO Iberoamericano cumple 25 años

En la década de los 90, tras el accidente de Chernóbil en 1986, los organismos reguladores radiológicos y nucleares empezaron a crear asociaciones para el intercambio de información y experiencias, principalmente en el ámbito de la seguridad nuclear. Una de las instituciones pioneras en este ámbito fue el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, conocido como el FORO, nacido el 9 de julio de 1997 en Veracruz (México) y formado originalmente por los organismos de Argentina, Brasil, Cuba, España y México, a los que se

sumarían posteriormente las autoridades de otros seis países. La calidad de sus trabajos, especialmente los proyectos técnicos realizados, han convertido el FORO en un referente internacional y un ejemplo de colaboración en los ámbitos de la seguridad nuclear y el uso de las radiaciones ionizantes. El pasado julio, Madrid acogió la celebración del 25 aniversario durante la reunión anual de los organismos participantes.

■ Texto: **Alfredo de los Reyes** | responsable de Relaciones Internacionales del CSN ■

Hasta los años noventa del pasado siglo, las colaboraciones multilaterales se daban principalmente bajo la coordinación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) o de la Agencia de la Energía Nuclear (NEA) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), que hasta entonces primaban más la parte promotora que la reguladora. Además, en muchas ocasiones, los retos

de los Estados Miembros eran muy diversos, por lo que no siempre cubrían las expectativas concretas de muchos reguladores, cuya principal forma de colaboración era mediante el intercambio de información de forma bilateral. Por entonces, el Consejo de Seguridad Nuclear tenía firmados numerosos acuerdos bilaterales, pero los de mayor actividad eran los firmados con los países de origen de la tecnología de las centrales nucleares

que se operaban en nuestro país: Estados Unidos, Francia y Alemania.

Esta cooperación bilateral, que se ha mantenido, requería sin embargo muchos recursos ya que conllevaba encuentros bilaterales periódicos con decenas de países. Además, a pesar de que las reuniones bilaterales suelen ser encuentros muy eficientes, ya que solo dos partes acuerdan los temas de las agendas y ponen en común su experiencia, en ocasiones contar

con más participantes permite plantear retos diferentes, por lo que permiten prepararse para futuras actividades.

Por este motivo algunos reguladores se plantearon crear asociaciones con un número limitado de miembros, pero con retos semejantes. La primera que se constituyó fue la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (INRA), que nació en enero de 1997 como el equivalente regulador del foro político intergubernamental G7 (Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Japón y Reino Unido). Sin embargo, en 1987 Italia había celebrado un referéndum sobre el uso de la energía nuclear y como consecuencia del voto contrario (80%), sus centrales aún en operación detuvieron definitiva-

ANSN (2002), la africana FNRBA (2009), la árabe ANNuR (2010) y la de Europa y Asia Central EuCAS (2016).

Pero la primera asociación regional de reguladores nucleares que se creó fue el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO), pocos meses después de INRA. La iniciativa partió de dos grandes referentes internacionales de la regulación, el argentino Dan Jacobo Beninson y el español Juan Manuel Kindelán, a los que se unieron inmediatamente el brasileño José Mauro Esteves, el cubano Ulises Hernández y el mexicano Miguel Medina, todos máximos responsables de los organismos reguladores de sus países. El vínculo de estos cinco visionarios fue,



Primera Reunión del Foro de Organismos Reguladores Iberoamericanos en 1997 en México.

mente su actividad entre 1987 y 1990. Así, los demás reguladores de los países del G7, considerando que los temas de colaboración serían muy diferentes entre estados con programas nucleares o sin ellos, decidieron invitar a sus homólogos de España y Suecia (9 y 12 reactores en operación en 1997) a unirse a este grupo. Más adelante se constituirían la Asociación de Reguladores de Europa Occidental (WENRA), en 1999, y otras redes o asociaciones regionales como la asiática

no solo la posibilidad de intercambiar información en materia de seguridad nuclear desde una perspectiva y problemáticas similares, sino la posibilidad de hacerlo en un idioma común, o casi común, el español.

Así, en la reunión que mantuvieron en la ciudad mexicana de Veracruz firmaron el acuerdo constituyente del FORO el 9 de julio de 1997. A pesar de que los retos, infraestructuras reguladoras e intereses eran distintos (en Cuba no

había reactores nucleares en operación, las tecnologías del parque nuclear de los otros cuatro países eran distintas y los organismos reguladores eran instituciones independientes o departamentos ministeriales) estaban creando la asociación regional de reguladores referente a nivel mundial del siglo XXI.

Las primeras reuniones de los máximos representantes de estos cinco organismos se fueron repitiendo anualmente en el país que ejercía la presidencia anual, siguiendo el orden alfabético. En sus primeros encuentros, tras poner en común sus retos y avances, debatían abiertamente sobre temas de interés común para mejorar sus prácticas de trabajo, pero, especialmente, creando un ambiente de confianza donde la transparencia pasó a ser rápidamente su seña de identidad.

Por entonces el FORO estableció sus objetivos y compromisos, definiendo su misión:

1. Promover la seguridad en todas las prácticas que utilicen materiales radiactivos y/o nucleares en la región iberoamericana.
2. Fomentar el intercambio de información y experiencias en materias de seguridad nuclear, radiológica y física entre sus miembros. Detectar, extraer, analizar y compartir conocimiento existente y nuevo, así como experiencias prácticas para mejorar la seguridad radiológica y nuclear en Iberoamérica.
3. Establecer relaciones con organismos nacionales, regionales e internacionales cuyas políticas y objetivos resulten de interés para el logro de sus objetivos.

Y su visión:

- a. Ser una organización comprometida con la mejora de la seguridad radiológica y nuclear en la región iberoamericana, así como en el plano internacional.

- b. Ser un ámbito fructífero para el fortalecimiento de las instituciones reguladoras de la región iberoamericana a través del intercambio de información y experiencias, así como del trabajo en temas de mutuo interés en las áreas de seguridad radiológica, nuclear y física.

Poco a poco los responsables de las cinco instituciones reguladoras constituyentes —la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) de Argentina, la Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) de Brasil, el Centro Nacional de Seguridad Nuclear (CNSN) de Cuba, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) de España y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) de México— comprendieron que podían hacer mucho más que intercambiar información y decidieron iniciar un Programa Técnico común, desarrollando proyectos innovadores de interés compartido. Pero para ello, el FORO debía crecer, crear

una infraestructura gestora y financiar la participación de sus expertos para participar en los grupos de trabajo que desarrollasen dichos proyectos.

De esta manera, en 2003 el FORO redacta su primer estatuto, que sería renovado en 2015, donde se establecen el Plenario, órgano rector integrado por los máximos representantes de los organismos miembros; el Comité Técnico Ejecutivo (CTE), para dar seguimiento al programa técnico; y la Secretaría, para la gestión administrativa y el seguimiento de las actividades institucionales. Además, para dar apoyo en la gestión del Programa Técnico, formalizar el acuerdo de cooperación establecido con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y para el Programa Extrapresupuestario para la Seguridad Nuclear en Iberoamérica con el que se financia el FORO (mediante las contribuciones voluntarias de sus miembros), se instaura la Secretaría Científica, ejercida por un alto representante del Departamento de Seguridad Nuclear del OIEA,

que desde el CTE da seguimiento al Programa Técnico, evitando duplicidades, e identifica a los oficiales técnicos que participarán en cada proyecto del FORO.

Sin duda el gran hito del FORO es el inicio de su Programa Técnico, cuyos resultados serán implementados no solo en los países cuyos organismos reguladores son miembros de la asociación sino en toda la región iberoamericana y en muchos otros países de todo el mundo, y es lo que hará de él un referente internacional.

Con todo ello, el FORO ganó institucionalidad, visibilidad y el compromiso de los cinco organismos miembros para colaborar en busca de una mejora continua, ya no solo en el ámbito de la seguridad nuclear, tecnológica y física de sus reactores de potencia, sino de todas sus instalaciones y actividades que utilizan radiaciones ionizantes. Como todas las grandes instituciones, el FORO necesitaba además adaptarse a la realidad mediática internacional, y por ello decidió dotarse de una página web para dar mayor visibilidad a la propia

Proyectos del Programa Técnico del FORO

Proyectos terminados:

- **Proyecto APS (2005-2009).** Análisis Probabilista de Seguridad de Tratamientos de Radioterapia con Acelerador Lineal
- **Proyecto MATRICES (2006-2010).** Aplicación del Método de la Matriz de Riesgo a la Radioterapia
- **Proyecto SEVRRRA (2010-2013).** Sistema para la Evaluación de Riesgos en Radioterapia
- **Proyecto PACIENTE (2006-2010).** Autoevaluación del Programa Regulador de la Protección Radiológica en las Exposiciones Médicas
- **Proyecto PREEV (2008-2011).** Prácticas Reguladoras en Envejecimiento y Extensión de Vida de las Centrales Nucleares de Potencia
- **Proyecto FUENTES (2009-2011).** Prevención, Detección y Respuesta frente a la Presencia Inadvertida de Material

Radiactivo en el Reciclado de Metales y otros Procesos Asociados

- **Proyecto CICLOTRONES (2011-2013).** Criterios para el Licenciamiento y Requisitos de Inspección de Instalaciones con Ciclotrones para Producción de Radioisótopos utilizados en Aplicaciones e Investigaciones Médicas
- **Proyecto EMERGENCIAS (2011-2014).** Guía Metodológica común para el Análisis de Emergencias Radiológicas e Identificación de Lecciones
- **Proyecto CULTURA DE SEGURIDAD (2012-2015).** Cultura de Seguridad en las Organizaciones, Instalaciones y Actividades con Fuentes de Radiación Ionizantes
- **Proyecto CREaN (2012-2015).** Guía para la Elaboración de un Programa de Creación y Desarrollo de Competencias de Reguladores de Reactores Nucleares
- **Proyecto SEVRRRA INDUSTRIA (2013-2016).** Método de Matriz de Riesgo en Radiografía Industrial
- **Proyecto DISPENSA (2014-2017).** Guía Práctica para la Implementación de la Dispensa en Instalaciones Radiactivas
- **Proyecto RESISTENCIA DE CCNN (2011-2018).** Resis-



Plenario de la reunión de Brasilia, Brasil, 2019.

asociación, presentar sus resultados y fomentar la colaboración entre los expertos de los organismos miembros. Nació así la RED (www.foroiberam.org).

Con la finalización de sus primeros proyectos, y dada la altísima calidad de sus resultados, el FORO consiguió ser reconocido por otras organizaciones. Afianzó su relación con el OIEA, empezó a cola-

borar con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA), la Asociación Europea de Autoridades competentes en Protección Radiológica (HERCA), la Asociación de Reguladores de Europa Oc-

cidental (WENRA) y la Red Europea de Organizaciones de Soporte Técnico (ETSON). También otros organismos reguladores de la región empezaron a interesarse en las actividades del FORO y solicitaron su incorporación en la asociación. Como consecuencia, en 2006 se incorporó la Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección (ARNR) de Uruguay, en 2008 la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), en 2010 el Instituto Peruano de Energía Nuclear

(IPEN), en 2014 el Ministerio de Minas y Energía (MINMINAS) de Colombia, en 2016 la Autoridad Reguladora Radiológica y Nuclear (ARRN) de Paraguay y, por último, en 2022 la Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

El FORO, al cumplir sus 25 primeros años en 2022, es un referente internacional no solo por la calidad de sus 15 proyectos

tencia de las Centrales Nucleares en los Países Iberoamericanos

- **Proyecto CREaR (2017-2020).** Competencias del Personal de Organismos Reguladores en Aplicaciones Radiológicas Médicas e Industriales
- **Proyecto SEVRRRA II (2016-2022).** Extensión de la Aplicación de la Metodología de Matrices de Riesgo a Nuevas Técnicas de Radioterapia: Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) y Medicina Nuclear Diagnóstica (MND)

Proyectos en desarrollo:

- **Proyecto de GAMMAGRAFÍA (2017).** Aplicación Piloto de la Metodología de Evaluación de la Cultura de Seguridad de la Guía del Foro a una Empresa de Gammagrafía Industrial
- **Proyecto REACTORES DE INVESTIGACIÓN (2017).** Estandarización del Proceso de Inspección de los Reactores Nucleares de Investigación
- **Proyecto CLOR (2018-en desarrollo).** Capacitación y Licenciamiento de Operadores de Reactores

- **Proyecto RADIOFARMACIAS (2019).** Criterios para el Licenciamiento y Requisitos de Inspección de Radiofarmacias Centralizadas
- **Proyecto TRANSPORTE (2019).** Mantenimiento y Verificaciones Periódicas de Bultos Reutilizables para el Transporte de Material Radiactivo No Sujetos a Aprobación de Diseño
- **Proyecto RESILIENCIA (2020).** Evaluación de la Resiliencia de la Operación Segura de las Centrales Nucleares, de los Reactores Nucleares de Investigación y de las Instalaciones Radiactivas en Tiempos de Pandemia
- **Proyecto SEGURIDAD FÍSICA (2021).** Seguridad Física en el Transporte Doméstico de Fuentes Radiactivas



Para más información sobre el FORO y el contenido y características de los proyectos técnicos:
<https://www.foroiberam.org/>

finalizados, sino también por su sostenibilidad y el espíritu de colaboración de sus miembros. No es por tanto casualidad que en 2008 Argentina declarase de interés nacional las actividades del FORO: En los años 2010, 2011 y 2012, en las Cumbres Iberoamericanas de Mar del Plata (Argentina), Asunción (Paraguay) y Cádiz (España), los jefes de Estado y de Gobierno iberoamericanos reconocieron la labor desarrollada por el FORO y, desde 2013, las Resoluciones de la Conferencia General del OIEA alaban el trabajo del FORO y piden a su Secretaría que continúe apoyando sus actividades.

El programa técnico del FORO

En 2003 el FORO acordó lanzar un Programa Técnico y financiarlo con sus propias aportaciones, a través de un programa extrapresupuestario, gestionado por el OIEA. Este programa técnico está basado esencialmente en el desarrollo de proyectos y actividades de interés común, con la participación de los mejores expertos de los organismos miembros y de especialistas del OIEA (oficiales técnicos). Esta colaboración se basa en diversos principios entre los que destacan:

- Interés regulador: los principales beneficiarios son las autoridades reguladoras de la región.
- Originalidad: los proyectos y actividades son innovadores.
- Equidad: independientemente de las aportaciones para la financiación del FORO, todos sus miem-

bros, en la medida de sus posibilidades y de su interés, pueden participar.

Se redactaron unos procedimientos regulando cómo lanzar un nuevo proyecto o actividad, su aprobación, su desarrollo, su finalización y su difusión, basados en los mayores estándares de garantía de calidad y gestión de proyectos.

Así, ante un nuevo reto para alguno de los organismos miembros o una pro-

puesta innovadora del Plenario u otro órgano del FORO, se identifican especialistas de las autoridades reguladoras y del OIEA que intercambian información sobre el tema. Si el conocimiento en alguno de los organismos miembros es suficiente para afrontar dicho reto, se transmite a los demás fomentando la colaboración entre especialistas. En caso contrario, si el tema identificado fuese también de in-



Plenario de la reunión de 2012, celebrada en La Habana, Cuba.



Reunión del Comité Técnico en Buenos Aires, Argentina, en 2017.



Los asistentes a la reunión de Madrid 2022 ante la sede del Consejo de Seguridad Nuclear.

terés para la mayoría de los miembros, el grupo de especialistas redacta una propuesta de proyecto con todos los datos requeridos en los procedimientos (objetivos, metas intermedias, cronograma, necesidades, identificadores y resultados esperados). El CTE revisa la propuesta, analiza su interés, su viabilidad y la posible colaboración con otras instituciones, además del OIEA, y hace una recomendación al Plenario para su aprobación. Tras el visto bueno, se comunica al OIEA que el nuevo proyecto será financiado mediante el Programa Extrapresupuestario y se solicita su participación.

Hasta la fecha, el FORO ha finalizado quince proyectos de gran complejidad reguladora, y se encuentra en proceso de desarrollo de otros siete, cubriendo prácticamente todas las áreas técnicas bajo la supervisión de sus organismos miembros: seguridad nuclear, protección radiológica, gestión de residuos, preparación y respuesta ante emergencias, licenciamiento de operadores, capacitación y gestión del conocimiento del personal regulador, seguridad física nuclear, transporte de material radiactivo...

Hacia una seguridad nuclear global

En 2022 el FORO está celebrando sus primeros 25 años de existencia, siendo un ejemplo de colaboración sostenible entre once organismos reguladores de la región iberoamericana. Su extenso Programa Técnico, con quince proyectos innovadores finalizados y otros siete en desarrollo, su RED para la difusión de sus resultados y la colaboración entre reguladores de la región y la estrecha colaboración con el OIEA y otras instituciones internacionales, han permitido mejorar la normativa y prácticas de trabajo de sus miembros.

Además, de acuerdo con su Plan de Acción, aprobado en 2020, el FORO quiere compartir sus resultados con todos los países interesados; para ello, además de ponerlos a disposición de todos a través de la RED, trabaja con el OIEA para su publicación (cinco TecDocs, un documento técnico, y cuatro resultados más en proceso de edición), y es miembro de la Red Global de Seguridad Nuclear y Física del OIEA (GNSSN), donde ha puesto su programa técnico a disposición de otras asociaciones de reguladores nucleares.

Como consecuencia, sus resultados están siendo ya empleados en muchos países de la región iberoamericana y son parte de la documentación base del Departamento de Cooperación Técnica del OIEA para sus cursos de formación y entrenamiento, con lo que, poco a poco, pasarán a ser muy probablemente utilizados en otros países fuera de esta región.

El reconocimiento al FORO no es solo evidente por las menciones que se han hecho de él en las resoluciones de las últimas conferencias generales del OIEA o las conclusiones de las cumbres de jefes de Estado de Iberoamérica, sino por las propuestas que recibe para colaborar con las principales instituciones internacionales en el ámbito de la seguridad nuclear y la protección radiológica y con otros organismos reguladores. El propio OIEA, que considera al FORO un socio prioritario, le invita a participar en las reuniones para definir la estrategia de su programa de cooperación en Latinoamérica y a intervenir en la mayoría de sus conferencias internacionales para la mejora del régimen global de la seguridad nuclear.



Fases 1 y 2 del proyecto HYMERES de la OECD/NEA sobre experimentos de contención para seguridad de reactores

Los accidentes de Three Mile Island 2 (EEUU) y Fukushima Dai-ichi (Japón) han demostrado la posibilidad de que se produzcan combustiones de hidrógeno en la contención y en otros edificios de las centrales nucleares durante accidentes con fusión de núcleo. Para determinar el riesgo de estos accidentes es necesario conocer con precisión la distribución de los gases que se liberan durante el accidente. Adicionalmente, en el accidente de Fukushima Dai-ichi se produjeron incrementos de la presión del pozo seco por encima de lo esperado, apuntando a la posibilidad de fenomenologías de estratificación térmica del agua en las piscinas de supresión.

La participación del CSN en los proyectos de investigación OECD/NEA-HYMERES fase 1 y 2 ha per-

mitido acceder a los últimos resultados experimentales de distribución de gases en la atmosfera de contención en estas condiciones, así como los fenómenos de estratificación en piscinas. Además, la colaboración con entidades españolas de investigación como el Ciemat y la ETSII-UPM, a través de convenios específicos con el CSN, ha significado un valor añadido en cuanto a las simulaciones realizadas de la fenomenología de los experimentos con códigos del estado del arte, su aportación en la definición de los experimentos y su participación en las reuniones.

■ Texto: **Juan Manuel Martín-Valdepeñas Yagüe** | Técnico del Área de Análisis Probabilista de Seguridad, representante del CSN en los proyectos HYMERES ■

Las centrales nucleares se diseñaron para soportar los accidentes postulados máximos previsibles que pudieran ocurrir durante la vida operativa de una central nuclear, estos accidentes se denominan Accidentes Base de Diseño.

Sin embargo, el accidente de la unidad 2 de la central nuclear de Three Mile Island ocurrido en EE.UU. en 1979 y el accidente de las unidades 1, 2 y 3 de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi en 2011 en Japón, han demostrado que era posible que se produjeran accidentes que fueran más allá de la Base de Diseño. En este tipo de accidentes, denominados “accidentes severos”, se puede producir la fusión del núcleo y verse amenazada la integridad de la contención.

En los accidentes severos se postula la pérdida de la capacidad de refrigeración del reactor, lo que provoca un aumento de la temperatura del núcleo que ocasionará un daño en los elemen-

tos combustibles que podría llegar a causar su fusión. Durante este proceso el material metálico de las varillas, principalmente el circonio, reaccionan con el vapor de agua generando hidrógeno. Además, en caso de que el accidente progrese hacia la fusión del núcleo éste podría provocar la rotura de la vasija y el núcleo fundido podría caer a la cavidad del reactor e interactuar con el hormigón, generando más hidrógeno y, adicionalmente, monóxido de carbono (CO).

Estos gases son combustibles y se distribuyen en la atmósfera de la contención de forma no uniforme, mezclándose con otros gases presentes o generados durante el accidente (aire, vapor de agua, dióxido de carbono, etc.). En los accidentes anteriormente mencionados se produjeron explosiones de hidrógeno en su transcurso.

La presencia de dichos gases combustibles puede suponer una complica-

ción adicional a la hora de aplicar las estrategias de gestión del accidente. Tanto por el efecto con los sistemas especialmente diseñados para su control, fundamentalmente los recombinadores de hidrógeno, como con otros sistemas de contención como los rociadores o enfriadores.

Por otro lado, en el accidente de Fukushima Dai-ichi se ha observado que las presiones medidas en el pozo húmedo de la contención son más elevadas de las calculadas con los códigos de simulación de accidentes severos, lo que indica la posibilidad de que se hubieran producido fenómenos de estratificación térmica del agua en dichas piscinas que no han sido contemplados en dichos códigos hasta la fecha (Figura 1).

Estos fenómenos afectan al comportamiento de la atmósfera de la contención cuyo conocimiento se necesario para diversos análisis de seguridad que se realizan en el CSN. Los resultados de

estos proyectos son de utilidad en diversas tareas como la evaluación de instalación de recombinares autocatalíticos pasivos (PAR por sus siglas en inglés —*Passive Autocatalytic Recombiners*—) en las centrales nucleares españolas, los análisis probabilistas de seguridad de nivel 2, etc.

Fenomenología

La fenomenología que se investiga en estos proyectos está relacionada con el movimiento de gases en la atmósfera de la contención o el movimiento del agua en las piscinas de supresión. La distribución de los gases o el agua de forma homogénea o no homogénea (estratificada) durante el transcurso de un accidente severo pueden llevar a resultados de presión final sobre la estructura de la contención muy diferente y por lo tanto la integridad de la contención verse amenazada o no.

La liberación de gases combustibles en la atmósfera de la contención durante un accidente severo se produce en forma de chorros o plumas que pueden acumularse, estratificarse o mezclarse en la propia contención. Además, procesos como la convección, la condensación sobre las paredes de la contención o la interacción con los sistemas de la contención como rociadores enfriadores o PAR, pueden afectar a esta distribución de gases en la contención (Figura 2).

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

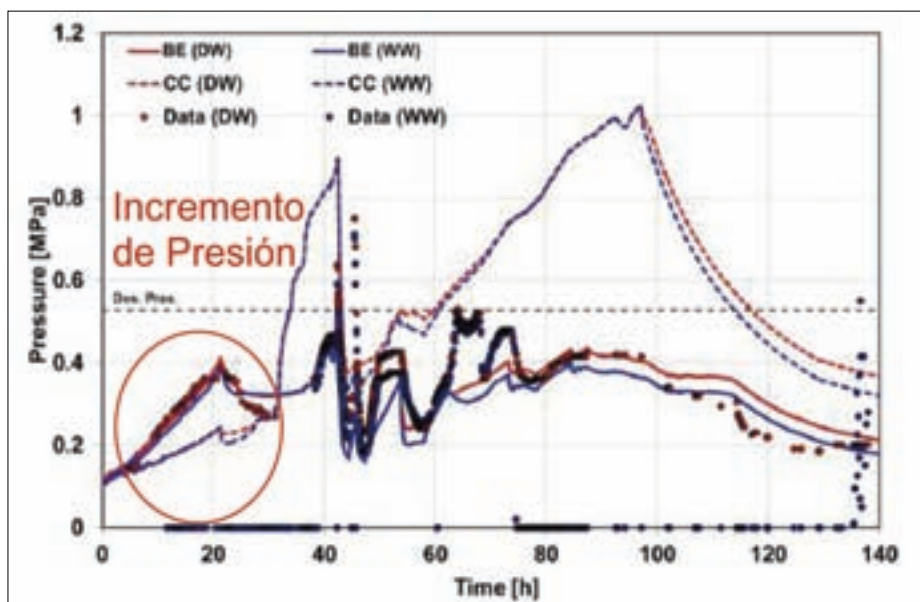


Figura 1. Evolución de presión en contención en Fukushima Dai-Ichi Unidad 3 (Fuente: Cálculo realizado por el Cimat con el código MELCOR para el proyecto BSAF-1).

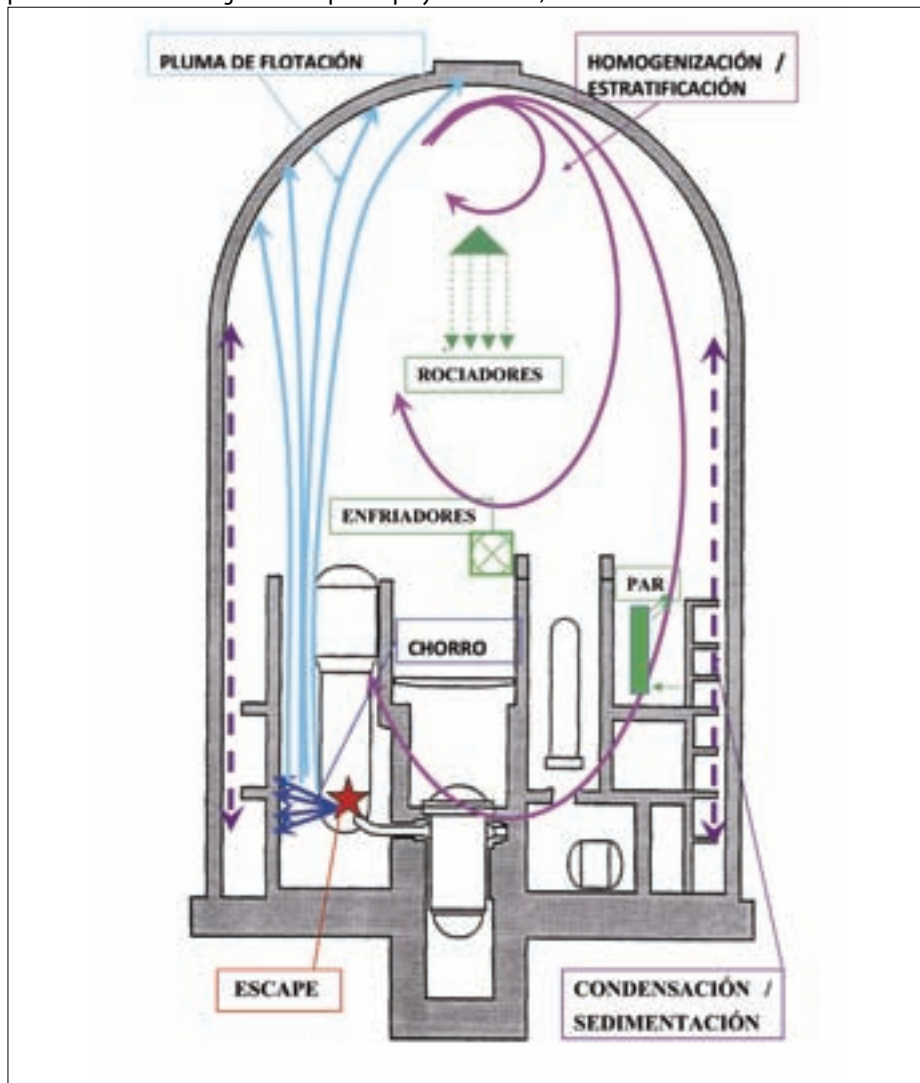


Figura 2. Fenomenología de distribución de hidrógeno y vapor en contención.

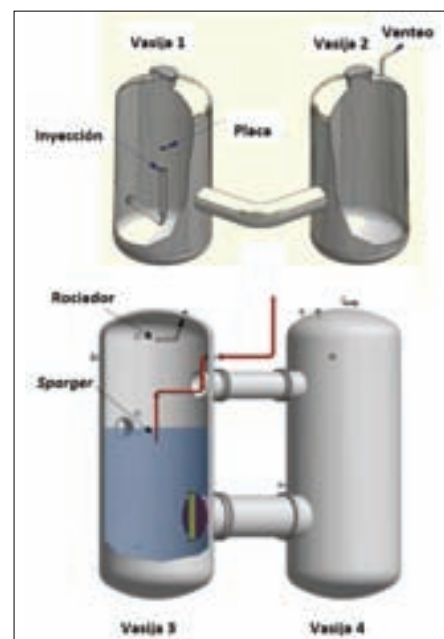
Entidades de investigación

Las tareas experimentales de los proyectos se han realizado por dos organizaciones, el Paul Scherrer Institute (PSI) de Suiza y el Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) de Francia. El PSI ha realizado experimentos en la instalación PANDA en las dos fases del proyecto, mientras que el CEA ha realizado los experimentos en la instalación MISTRA únicamente en la primera fase del proyecto.

El proyecto HYMERES fase 1 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos/Agencia de la Energía Atómica (OECD/NEA por sus siglas en inglés) se ejecutó en el periodo de 2013 a 2016 y en dicha fase participaron 15 países. En la segunda fase del proyecto, que se ha ejecutado en el periodo 2017 a 2021, han participado 11 países. Entre los países participantes se encuentran: Canadá (únicamente fase 1), China, República Checa, Finlandia, Estados Unidos (únicamente fase 2), Francia (únicamente fase 1), Alemania, India, Japón, Corea, Federación Rusa, España, Suecia y Suiza.



Figura 3 Instalación experimental PANDA (Fuente: PSI).



Participación española

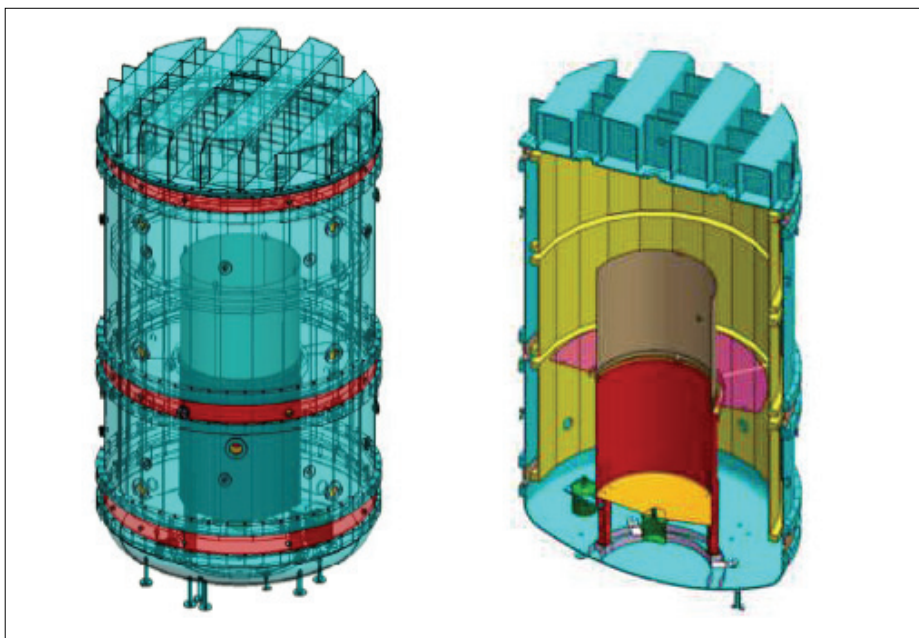
El CSN ha participado en el proyecto haciendo seguimiento de los experimentos y participando en las reuniones. Adicionalmente, el CSN ha contado con la colaboración de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) y el Área de Ingeniería Nuclear de la Escuela Técnica

Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid (ET-SII-UPM).

El Ciemat, a través del proyecto ACAS "Acuerdo CSN-Ciemat de Colaboración en Accidente Severo" (2014-2018) ha dado apoyo técnico al CSN y participado en reuniones del proyecto, ha realizado cálculos con el código FLUENT de experimentos de las series HP1 y HP2 y participado en



Figura 4 Instalación experimental MISTRA (Fuente: CEA)



el ejercicio comparativo de cálculo de la fase 1. Además, ha colaborado en la definición de la serie experimental HP5.

La UPM, a través del proyecto GOMERES “Convenio UPM-CSN sobre Simulación con el código GOTHIC de experimentos del proyecto HYMERES Fases 1 y 2” (2019-2022) ha dado apoyo técnico al CSN y participado en reuniones del proyecto. Además, ha realizado cálculos con el código GOTHIC de experimentos de las series HP5 y H2P5 y ha colaborado en la definición de las series experimentales H2P4 y H2P5, ha realizado cálculos pretest específicos para dichas series y colaborado en la definición de las mismas.

Instalaciones experimentales

La instalación experimental PANDA del PSI es una instalación de gran escala única en el mundo adecuada para realizar experimentos para investigar de forma integral el comportamiento de la contención y sus sistemas durante accidentes (Figura 3). En ella también se puede realizar el estudio de efectos tridimensionales de distribución de gases o agua entre varios compartimentos. La instalación está formada por cuatro vasijas conectadas, formando una estructura de 25 m de altura y 414 m³ de volumen. Las dos vasijas superiores son de 90 m³ y en ellas se han realizado los experimentos de distribución de gases en las dos fases del proyecto HYMERES. Las dos vasijas inferiores, de 117 m³ cada una, se utilizan, generalmente para los experimentos de piscina de supresión.

La instalación experimental MISTRA del CEA es una instalación dedicada al estudio de la termohidráulica de la contención y análisis de riesgo de hidrógeno (Figura 4). Está formada por una vasija con internos de 7,4 m de altura y un volumen total de 100 m³. En su interior dispone de tres condensadores anulares y una estructura que simula una compartimentación básica de la contención. En esta instalación

Tabla 1 Experimentos del proyecto OECD/NEA-HYMERES fase 1

Descripción	PANDA	MISTRA
Efectos separados y obstrucciones		
Subserie Ia:	5	4+1
Chorros horizontales	HP1_1,	MAKET,
con obstrucciones verticales	HP1_2,	HM1_1,
	HP1_3,	HM1_2,
	HP1_4,	HM1_3,
	HP1_5	HM1_4
Subserie Ib:	3	--
Chorros verticales	HP1_6,	
con obstrucción horizontal	HP1_7,	
	HP1_8	
Sistemas y componentes de seguridad		
Serie II: Una fuente de calor	2+1	2+1
(1 PAR) con obstrucciones	HP2_0,	HM2_0,
de flujo horizontales.	HP2_1 and	HM2_1,
	HP2_2	HM2_2,
Serie III: Dos fuentes de calor	1	3
(2 PAR) con obstrucciones	HP3_1	HM3_1,
de flujo		HM3_2,
		HM3_3
Serie IV: Rociadores	4+1	--
y enfriadores	HP4_0,	
	HP4_1,	
	HP4_2,	
	HP4_3,	
	HP4_4	
Serie V: Estratificación térmica	7+1	--
en piscinas de agua	HP5_0,	
	HP5_1,	
	HP5_2,	
	HP5_3,	
	HP5_4,	
	HP5_5,	
	HP5_6,	
	HP5_7	
Serie VI: Circulación natural	2	--
inducida por compuertas	HP6_1 and	
y efecto en los sistemas	HP6_2	
de seguridad		
Número total de tests	24 3 adicionales	9 2 adicionales

se han realizado experimentos de distribución de gases dentro en la primera fase del proyecto OECD/NEA-HYMERES.

En ambas instalaciones experimentales se utiliza helio para simular hidrógeno.

Experimentos del proyecto OECD/NEA-HYMERES Fases 1 y 2

En la fase 1 del proyecto se propusieron las series experimentales en las instala-

ciones PANDA y MISTRA que se muestran en la tabla 1. En total se realizaron 38 experimentos, de los cuales 24 experimentos fueron propuestos originalmente en la instalación PANDA, a los que se añadieron 3 más. En la instalación MISTRA se realizaron 9 experimentos más 2 adicionales. En la tabla 1 se marca en negrita aquellos test que se han realizado de forma adicional.

Tabla 2 Experimentos del proyecto OECD/NEA-HYMERES fase 2

Descripción	Test	
Efectos separados y obstrucciones		
Serie H2P1: Chorros y plumas que interactúan con varias obstrucciones		
Subserie H2P1p-sh: Interacción de chorros y plumas verticales de vapor y helio a elevadas temperaturas con uno o dos discos horizontales	3+3	H2P1_2_2, H2P1_3, H2P1_4, H2P1_0, H2P1_1, H2P1_5
Subserie H2P1g-sh: Interacción de chorros y plumas verticales de vapor y helio a elevadas temperaturas con rejillas	2	H2P1_6 H2P1_10_2
Subserie H2P1a-ah: Interacción de chorros y plumas verticales de vapor y helio a elevadas temperaturas con una placa horizontal	2+4	H2P1_11, H2P1_12, H2P1_14, H2P1_15, H2P1_16, H2P1_17
Caracterización de test sin obstrucciones con una vasija	0+2	H2P1_TE, H2P1_TE2
Serie H2P2: Efectos de radiación térmica	5	H2P2_1, H2P2_2, H2P2_3, H2P2_4, H2P2_5
Supresión de vapor en piscinas de agua		
Serie H2P3: Estratificación térmica en piscinas de agua con <i>sparger</i>	6+1	H2P3_1, H2P3_2, H2P3_3, H2P3_4, H2P3_5, H2P3_6
Serie H2P4: Comportamiento de sistemas de contención BWR con y sin rociadores	2	H2P4_2, H2P4_3
Sistemas y componentes de seguridad		
Serie H2P5: Anillos de rociadores	2	H2P5_1, H2P5_2
Serie H2P6: Interacción entre patrones de varios enfriadores	2	H2P6_1, H2P6_2
Número total de test	24	10 adicionales

En la segunda fase del proyecto se han propuesto en la instalación PANDA las series experimentales que se muestran en la tabla 2. En total se han realizado 34 experimentos de los cuales 24 fueron propuestos originalmente y se añadieron

diez experimentos adicionales o de referencia. En la tabla 2 se marcan en negrita aquellos test que se han realizado de forma adicional.

En los siguientes apartados se describen algunas de las series experimentales.

Experimentos de interacción de chorros con obstáculos

En proyectos anteriores como OECD/NEA-SETH y OECD/NEA-SETH-2, realizados en las instalaciones PANDA y MISTRA, se investigaron las condiciones para alcanzar situaciones de estratificación de helio al liberarse desde distintos puntos de las vasijas experimentales. Partiendo de esta situación de una atmósfera con una capa estratificada de helio y ya dentro del proyecto HYMERES, en las series HP1, HM1, H2P1 se ha investigado el efecto sobre esta capa estratificada de helio de un chorro horizontal o vertical de vapor (ver vasija 1 en figura 3). Este chorro antes de alcanzar la capa estratificada interacciona con uno o dos obstáculos (placas o rejillas). El chorro pierde parte de su inercia al chocar con el obstáculo y una vez superado en forma de pluma tiende a mezclar la capa estratificada (ver figura 5).

Entre las dos fases del proyecto se han realizado 29 experimentos para estas series, incluyendo los test de referencia. Los resultados experimentales muestran, en general, un retraso en la erosión de la capa de helio estratificada en función de la inercia que pierde el chorro al impactar con el obstáculo, frente a los test de chorro vertical sin obstáculo. Los mayores retrasos en la erosión se producen cuando los chorros horizontales impactan sobre placas verticales localizadas suficientemente cercanas de la boquilla para que se produzca una mayor pérdida de inercia. Sin embargo, los chorros verticales que impactan con discos horizontales presentan menores retrasos en la erosión de la capa estratificada, aunque dependen de la superficie del obstáculo, el flujo másico de vapor y/o número de obstáculos. En los casos en que el obstáculo es una rejilla, no se observa un efecto significativo en el retraso de la erosión respecto de no existir obstáculos.

En resumen, cuanto mayor es la per-

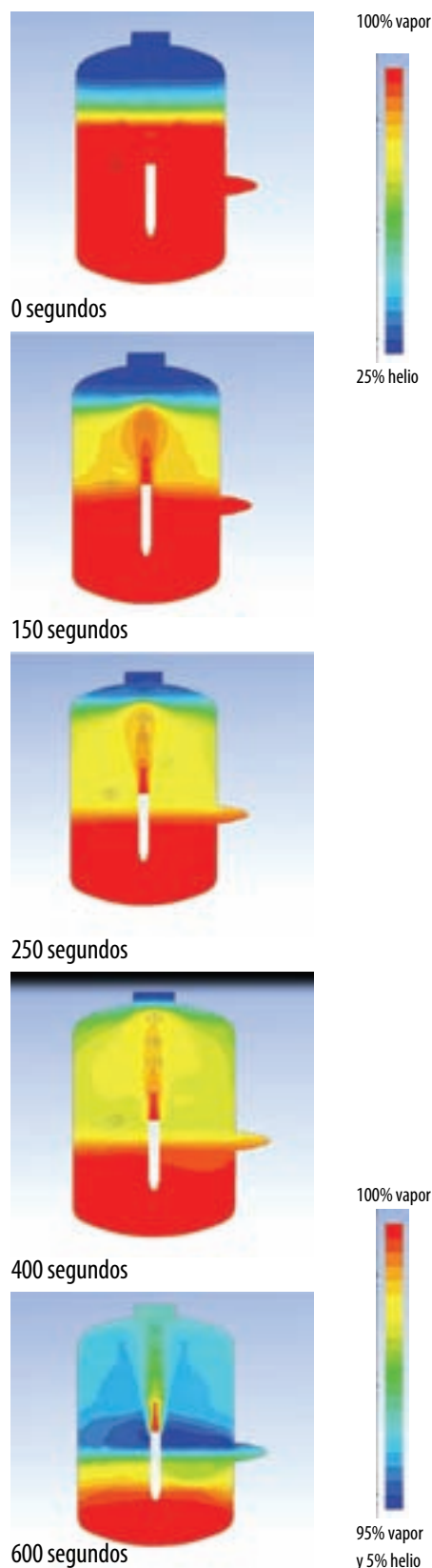


Figura 5: Erosión de una capa estratificada de He por un chorro/pluma de vapor que interactúa con un obstáculo en la instalación PANDA (Fuente: Simulación con FLUENT de experimentos de la serie HP1 realizada por el Ciemat dentro del proyecto CSN/Ciemat/ACAS).

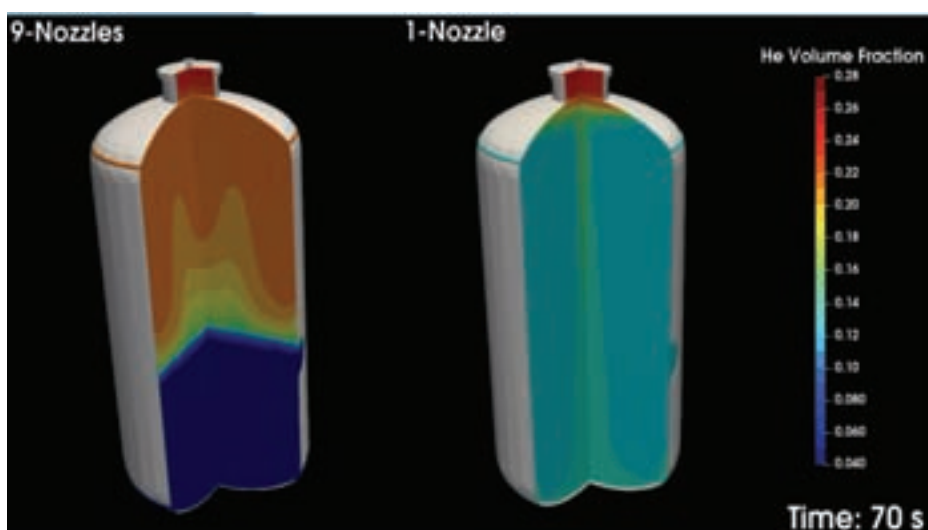


Figura 6: Concentración de He en la contención de la instalación PANDA a los 70 segundos. Situación no homogénea en el caso de rociadores de 9 toberas y homogénea en el caso de una tobera.

(Fuente: Simulación con GOTHIC de experimentos de la serie H2P5 realizada por la ETSII-UPM dentro del proyecto CSN/UPM-GOMERES)

didada de la inercia del chorro más tiempo durará la capa estratificada.

Experimentos de interacción de sistemas de contención

Tanto en las dos fases experimentales de HYMERES como en experimentos previos en las instalaciones PANDA y MISTRA se ha estudiado el comportamiento de la atmósfera de contención y su interacción con diversos sistemas de contención, fundamentalmente rociadores, enfriadores y PAR, que se simulan en los experimentos con helio por medio de calentadores.

En las series experimentales HP2 y HM2 se ha estudiado el efecto de mezclado de la atmósfera estratificada con un PAR y en las series HP3 y HM3 con dos PAR, colocados en distintas posiciones. El principal resultado es que estos dispositivos no tienen capacidad de succión de los gases que se encuentran suficientemente por debajo de su localización, por lo que es recomendable localizar también PAR en zonas bajas de la contención en las que el hidrógeno se pueda quedar atrapado. Por otro lado, las plumas de flotación que se generan en las salidas de los PAR son una importante

fuerza de momento que pueden interaccionar con los flujos convectivos de circulación de la atmósfera, fundamentalmente con los patrones globales de circulación que se establecen en la atmósfera por la condensación y la transmisión de calor con las paredes frías.

En la serie H2P5 se ha comparado el efecto de mezclado de un experimento de rociadores con una tobera y con nueve toberas con el mismo flujo total de agua. La comparación de los experimentos muestra que el decrecimiento inicial de la presión de la atmósfera por la actuación de los rociadores es más rápido con una tobera, pero al final de los experimentos las presiones tienden a igualarse. Lo mismo ocurre con el mezclado más rápido del helio en el caso de una tobera, debido a la mayor transferencia de momento de las gotas al vapor (figura 6). Sin embargo, al final de la fase de inyección de agua por los rociadores la estratificación térmica de la atmósfera es mayor con una tobera que con nueve.

En la serie H2P6 se ha comparado el efecto de mezclado teniendo un enfriador y tres enfriadores (los dispositivos probados en estos experimentos no disponen de ventilador). Los resultados

muestran un comportamiento cualitativo muy similar en ambos experimentos con una primera fase de reducción rápida de la capacidad de enfriamiento y una segunda fase en la que se produce una cierta recuperación de la presión para terminar volviendo a perder la capacidad de enfriamiento de los enfriadores.

En general se ha comprobado que el proceso es aditivo, de tal forma que no hay una importante interacción entre los distintos enfriadores, por lo que se demuestra que es razonable modelar varios enfriadores como uno único con una superficie equivalente de transmisión de calor.

En las series HP4 se ha dispuesto de rociador con una tobera y un enfriador. Se han realizado cinco experimentos de cinco fases cada uno en los que se inyecta vapor y helio. Además, en la tercera y quinta fase se activan los rociadores excepto en el primer test, tomado como referencia. Se han probado dos tipos de toberas y dos configuraciones de enfriador (abierto o con la parte trasera cerrada).

En general, antes de la activación de los rociadores la atmósfera tiende a estratificarse en helio y en temperatura, a pesar del funcionamiento de los enfriadores que extraen calor de la atmósfera. Sin embargo, al actuar los rociadores se produce un mezclado efectivo de la contención. La inyección de agua más fría en la quinta fase del experimento hace que la caída de la presión sea mayor. La configuración del enfriador con la parte trasera cerrada reduce ligeramente la capacidad de extracción de calor del mismo, especialmente durante las fases de actuación de los rociadores.

Experimentos de estratificación en piscinas de supresión

A diferencia de los experimentos de mezcla y distribución de helio, los experimentos de estratificación térmica en piscinas de supresión no se habían realizado

Tabla 3 Experimentos de estratificación térmica en piscinas de supresión (proyecto OECD/NEA-HYMERES fases 1 y 2)

Experimentos	Fases	Mezclado	Condiciones
HP5_1/2/3	2	sparger (vapor)	Variación de:
HP5_4/6/7	2	sparger (vapor)	■ temperatura inicial de piscina
		tobera (agua)	■ flujo másico de vapor en las fases
HP5_5	4	sparger (vapor + He)	■ duración de las fases
H2P3_1/2/3	4 - 2	sparger (vapor)	■ flujo masico y temperatura del agua en la tobera
H2P3_4/5/7	5	LRR (vapor)	■ flujo másico de helio
H2P3_6	8	LRR (vapor)	

en la instalación experimental PANDA previamente al proyecto OECD/NEA-HYMERES. En estas series experimentales (HP5 y H2P3) se utiliza una de las vasijas inferiores (ver vasija 3 en figura 3), llena parcialmente de agua, para simular diversas situaciones de formación de estratificaciones térmicas y procesos de mezcla en dicha piscina.

En esta piscina se libera vapor con o sin helio a través de un sparger o agua a través de una tobera. El sparger presenta 32 agujeros en la cabeza inferior y ocho agujeros en la parte intermedia (denominado LRR por sus siglas en inglés – Load Reduction Ring –) normalmente cerrado excepto en los últimos experimentos. La matriz experimental se indica en la tabla 3.

En general en los experimentos se parte de una piscina homogénea y se establece una situación estratificada mientras se libera vapor a través del sparger. Al incrementarse la tasa de liberación de vapor se establece un mezclado del agua de la piscina que rompe esa estratificación parcial o totalmente (ver figura 7).

En los experimentos se ha observado que la mezcla se favorece si se aumenta la temperatura inicial de la piscina o la tasa de liberación de vapor. Si se libera agua por la tobera el efecto es comparable al del vapor por el sparger. Sin embargo, si se añade helio al vapor liberado por el sparger el proceso de mezclado es mucho más rápido. En los casos con liberación

de vapor por el LRR, el efecto de menor flujo másico de vapor liberado es compensado por las fuerzas de flotación que doblan el flujo hacia arriba, mezclando de forma efectiva la piscina en la parte alta, pero manteniendo una estratificación térmica a cotas más bajas.

Ejercicios de comparativos de cálculo

Durante el proyecto las organizaciones firmantes del acuerdo u organizaciones colaboradoras (principalmente organismos de investigación o universidades) han realizado diversas simulaciones de los experimentos, para definir las condiciones más adecuadas de los mismos (cálculos “pretest”) o para reproducir los resultados experimentales. Estos análisis se han realizado fundamentalmente con códigos de fluidodinámica computacional con capacidad tridimensional, tanto comerciales como específicos de contención.

Adicionalmente se han organizado ejercicios comparativos de cálculos realizados por diferentes instituciones para un experimento previamente seleccionado, estos ejercicios se han abierto a organizaciones externas al proyecto para ampliar la difusión de los resultados. Los ejercicios se han realizado en dos fases una primera fase sin conocimiento de los resultados experimentales o fase “ciega” y una segunda fase disponiendo de

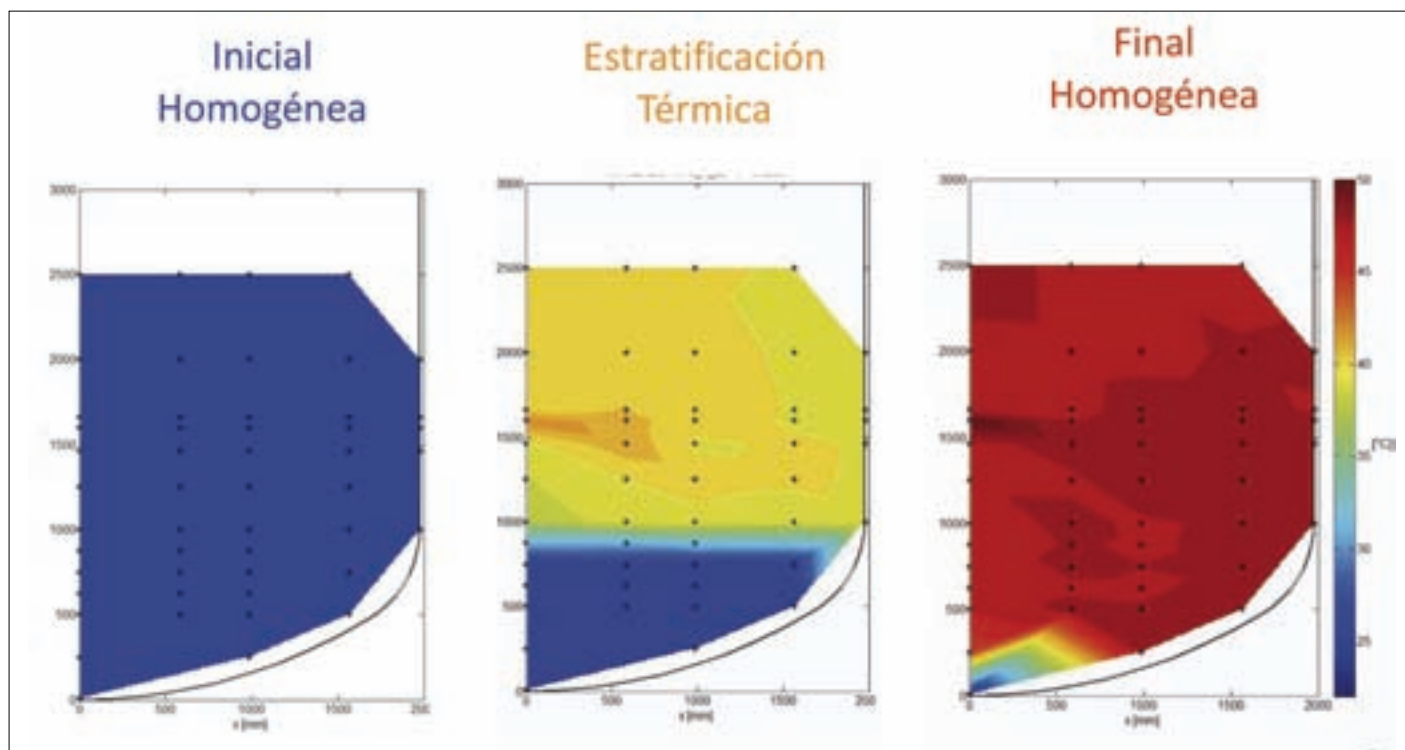


Figura 7. Medidas de temperatura de la evolución de la mezcla/estratificación del agua en una piscina en los experimentos de la serie HP5/H2P3 (Fuente: PSI)

los resultados experimentales o fase “abierta”.

En general, los resultados de los participantes en la fase “ciega” mostraron una gran dispersión de resultados en comparación con los resultados experimentales, debido a las diferentes mallas, hipótesis de modelación, modelos utilizados y diversos efectos de usuario. Sin embargo, en la fase “abierta” los resultados fueron más precisos, y tendiendo a converger los cálculos de las distintas organizaciones. En general, en estas segundas fases los participantes ajustan las mallas y usan modelos más sofisticados de turbulencia. Además, se ha observado que la utilización de modelos de transmisión de calor por radiación suele mejorar los resultados en experimentos con atmósferas con vapor. Por último, en los experimentos en los que se ha modelado una rejilla con un medio poroso, se ha

demostrado que los resultados globales han sido adecuados.

Los resultados de estos ejercicios muestran la importancia de realizar validaciones de los códigos de cálculo y los usuarios frente a experimentos con anterioridad a la aplicación de estos códigos en análisis de seguridad, así como la necesidad de disponer de cálculos independientes para las evaluaciones de seguridad.

Continuación del proyecto

En la actualidad la OECD/NEA está lanzando una tercera fase del proyecto que se denomina OECD/NEA-PANDA. La mayoría de las organizaciones que han participado en fases anteriores del proyecto, entre ellas el CSN, han mostrado su interés para participar. Las series experimentales propuestas son:

■ Serie I: Chorros y plumas actuando

con compartimentos complejos.

- Serie II: Efectos de radiación térmica con fases de inyección compleja, niebla, placa caliente, etc.
- Serie III: Circulación natural entre dos compartimentos que simulan los recintos de los Generadores de Vapor y la actuación de anillos de rociadores.
- Serie IV: Sistemas de enfriamiento pasivo de la contención (PCCS).
- Serie V: Convección natural en piscinas con estructuras calientes.
- Serie VI: Comportamiento de piscinas de supresión.

Se ha propuesto realizar 24 experimentos a distribuir entre las distintas series experimentales en función de los intereses de los participantes, adicionalmente se prevé realizar más de 6 test adicionales de referencia. ©

La Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES)

■ Texto: **José Antonio Rodríguez** | Jefe de Área de Experiencia Operativa y Normativa ■

¿Qué es la INES?

La Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES) se ha diseñado para medir la importancia de sucesos relacionados con la seguridad nuclear y la protección radiológica. El principal objetivo de la escala INES es la de comunicar al público de manera rápida y coherente la importancia desde el punto de vista de la seguridad de sucesos asociados a las fuentes de radiación.

Se proporciona información fiable con un lenguaje que debe ser asequible a todos y facilitar una comprensión común entre la comunidad técnica, los medios de comunicación y el público a nivel nacional e internacional.

¿Para qué sirve?

Con esta escala se clasifican múltiples tipos de sucesos, todos ellos relacionados

con la seguridad nuclear o la protección radiológica, debidos a usos industriales, a radiografías, al empleo de fuentes de radiación en hospitales, a actividades en instalaciones nucleares y al transporte de materiales radiactivos.

Solo se usa para clasificar sucesos ocurridos en instalaciones civiles. No se debe usar para evaluar o comparar el comportamiento de la seguridad entre instalaciones, organizaciones o países, ni para poner en marcha medidas de respuesta a emergencias.

Un poco de historia

Tras algunos incidentes en instalaciones nucleares recogidos por la prensa, se identificó la necesidad de elaborar una escala para clasificarlos de manera similar a la que se utiliza para terremotos.

Aprovechando la experiencia de Francia y Japón, que ya disponían de escalas propias, expertos internacionales convocados por el OIEA y la NEA de la OCDE emitieron una primera versión en 1990 que únicamente se aplicó a sucesos de centrales nucleares. Posteriormente se amplió y adaptó hasta la versión actual, de 2008, que contempla todos los sucesos relacionados con transporte, almacenamiento y uso de materiales radiactivos y fuentes de radiación en todo tipo de instalaciones civiles.

¿Cómo es la escala INES?

Los sucesos sin significación para la seguridad están clasificados como “Debajo de escala / Nivel 0”. De 1 a 3 se denominan “incidentes” y de 4 a 7, “accidentes”. Es una escala logarítmica; es decir, los sucesos de cada nivel son aproximadamente 10 veces más graves que en el nivel inmediatamente inferior.

¿Cómo clasificamos un suceso?

El manual de la escala INES consta de 7 capítulos y varios apéndices.

El capítulo 1 es un resumen de la escala. Establece los criterios generales. Se debe usar al principio y al final de cada clasificación para comprobar que es adecuada y coherente con estos criterios.

El capítulo 2 aplica a sucesos que tienen un efecto real sobre las personas o el medio ambiente. Estos sucesos serán al menos INES 2.



El capítulo 3 aplica a instalaciones que tienen definida una contención, como las centrales nucleares o las fábricas de combustible, y que han sufrido un daño en barreras que impiden la salida de material radiactivo al medioambiente. Estos sucesos serán al menos INES 2.

Los capítulos 4 a 6 analizan la defensa en profundidad para los distintos tipos de instalaciones. Se analizan los fallos en sistemas de seguridad cuya misión es impedir que un suceso progrese hasta ser un accidente. Se analizan sucesos potenciales, sin consecuencias, por lo que se clasifican como incidentes, INES 1 a 3.

El capítulo 7 proporciona un conjunto de diagramas para ayudar a clasificar los sucesos.

Algunos ejemplos

Los accidentes de Chernobyl y Fukushima fueron INES 7.

En España se han clasificado por encima de INES 1 cuatro sucesos, todos en centrales nucleares:

- Vandellós I (1989), INES 3. Un incendio provocó la pérdida de los sistemas de seguridad. Se clasificó de acuerdo con los criterios de defensa en profundidad.
- Trillo (1992), INES 2. Inoperabilidad de sistemas de seguridad mantenida durante 4 años de forma inadvertida. Se clasificó de acuerdo con los criterios de defensa en profundidad.
- Vandellós II (2004), INES 2. Inoperabilidad del sistema de agua de servicios esenciales. Se clasificó de acuerdo con los criterios de defensa en profundidad.
- Ascó I (2008), INES 2. Detección de partículas radiactivas en el emplazamiento. Se clasificó de acuerdo con los criterios de efectos en el medioambiente.

Descripción general de los niveles de la INES

Nivel de la INES	Personas y medio ambiente	Barreras y controles radiológicos	Defensa en profundidad
Accidente grave Nivel 7	Liberación grave de materiales radiactivos con amplios efectos en la salud y el medio ambiente, que requiere la aplicación y prolongación de las contramedidas previstas.		
Accidente importante Nivel 6	Liberación importante de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de las contramedidas previstas.		
Accidente con consecuencias de mayor alcance Nivel 5	- Liberación limitada de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de algunas de las contramedidas previstas. - Varias defunciones por radiación.	- Daños graves en el núcleo del reactor. - Liberación de grandes cantidades de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de exposición del público; provocada posiblemente por un incendio o un accidente de criticidad grave.	
Accidente con consecuencias de alcance local Nivel 4	- Liberación menor de materiales radiactivos, con escasa probabilidad de tener que aplicar las contramedidas previstas, salvo los controles locales de alimentos. - Al menos una defunción por radiación.	- Fusión de combustible o daño al combustible, que provoca una liberación superior al 0,1% del inventario del núcleo. - Liberación de cantidades considerables de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de importante exposición del público.	
Incidente importante Nivel 3	- Exposición diez veces superior al límite anual establecido para la exposición de los trabajadores. - Efecto no letal de la radiación en la salud (por ejemplo, quemaduras).	- Tasas de exposición superiores a 1 Sv/h en una zona de operación. - Contaminación grave en una zona no prevista en el diseño, con escasa probabilidad de exposición importante del público.	- Cuasi accidente en una central nucleoelectrica sin disposiciones de seguridad pendientes de aplicación. - Pérdida o robo de fuentes selladas de radiactividad alta. - Entrega equivocada de fuentes selladas de radiactividad alta, sin que existan procedimientos adecuados para manipularlas.
Incidente Nivel 2	- Exposición de una persona del público por encima de 10 mSv. - Exposición de un trabajador por encima de los límites anuales reglamentarios.	- Niveles de radiación superiores a 50 mSv/h en una zona de operación. - Contaminación importante dentro de una instalación en una zona no prevista en el diseño.	- Fallos importantes en las disposiciones de seguridad, aunque sin consecuencias reales. - Hallazgo de una fuente sellada huérfana, de un dispositivo o de un embalaje para el transporte de radiactividad alta, con indicación de las disposiciones de seguridad, sin que haya habido menoscabo. - Embalaje inadecuado de una fuente sellada de radiactividad alta.
Anomalia Nivel 1			- Sobree Exposición de una persona del público por encima de los límites anuales reglamentarios. - Problemas menores en componentes de seguridad, con importantes medidas de defensa en profundidad pendientes de aplicación. - Pérdida o robo de fuentes radiactivas, de dispositivos o de embalaje para el transporte de actividad baja.

Sin significación para la seguridad
(Debajo de la escala/ Nivel 0)

María Teresa Macías Domínguez se licenció en Ciencias Biológicas y realizó una breve estancia en los National Institutes of Health (Washington), donde se especializó en protección radiológica. A este ámbito ha dedicado su vida profesional, dentro del Instituto de Investigaciones Biomédicas (IIB, centro mixto CSIC-UAM), donde ingresó en 1989. En 1993 asumió la coordinación de todas las instalaciones radiactivas del CSIC y desde 2001 es jefe del Servicio de Protección Radiológica del IIB. Ha participado y dirigido numerosos proyectos de investigación, impartido cursos y publicado artículos científicos en

revistas internacionales, siempre en el campo de la protección radiológica y la gestión de residuos radiactivos. En 1990 ingresó en la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR), la asociación de profesionales que utilizan radiaciones ionizantes, donde ha colaborado desde su incorporación en diferentes actividades: coordinó su revista Radioprotección entre 1994 y 1998, fue secretaria general de 2006 a 2010 y vicepresidenta de 2019 a 2021. El pasado año fue elegida presidenta de la organización. Además, en la actualidad es miembro de la delegación española del Comité UNSCEAR.

María Teresa Macías, presidenta de la Sociedad Española de Protección Radiológica

“Cualquier trabajo con radiaciones ionizantes debe estar sometido al principio básico de la justificación”

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Periodista de ciencia ■ Fotos: **Julio Fernández González** ■

PREGUNTA: ¿Cuándo nació la SEPR?

RESPUESTA: El año pasado celebramos el 40 aniversario y nació por iniciativa de unos cuantos expertos, que identificaron una serie de cuestiones y decidieron unirse para resolverlas e iniciar una hoja de ruta. La verdad es que lo hicieron con mucha ilusión, con muchas ganas de trabajar, y nos fueron convenciendo a los demás, a los que en aquel momento éramos jovencitos y 40 años después hemos

pasado de un grupo de diez o doce socios, que fueron los pioneros, a los 708 o 709; que está muy bien. Uno de aquellos pioneros era nuestro socio fundador, Emilio Iranzo, que falleció el año pasado.

P: Pero la gente que se dedica a actividades sometidas a medidas de protección radiológica son muchos más, ¿no?

R: Claro. Una de las cualidades, la característica más específica que tiene la SEPR, es su carácter multidisciplinar. O

sea, unimos a un colectivo de profesionales que trabaja en diferentes sectores: en sanidad, en industria, en el sector nuclear, en investigación, en el organismo regulador... Por eso, aunque tengamos un 35 % de socios del sector sanitario, hay muchos más profesionales que trabajan en ese sector y lo que ocurre es que muchos están vinculados a la Sociedad Española de Física Médica (SEFM), porque se sienten más identificados. Lo mis-

mo ocurre en la industria, con los trabajadores de radiografía y gammagrafía industrial. Hay muchísimas empresas, pero no todas están afiliadas a la sociedad.

P: ¿Hay socios individuales y colectivos?

R: Sí, sí. Tenemos los socios de número, esos 708 o 709, y 25 socios colaboradores que son la base económica en cierta medida para el desarrollo de las actividades que la sociedad lleva adelante. De hecho, uno de los objetivos que tiene la actual junta directiva es intentar im-

ciendo ahora, tanto nosotros como juntas directivas precedentes, es por nuestros socios jóvenes. Ellos son el presente y el futuro. Tenemos que apostar por ellos, porque nuestra sociedad, como ocurre en el Consejo y en muchas instituciones, está en puertas de hacer un relevo generacional. Entonces tenemos que hacer esa transmisión del conocimiento. Ellos son muy receptivos y además en muchas ocasiones nos aportan mucha ilusión. Ven caminos nuevos que

P: ¿Cuáles son sus objetivos?

R: Nuestra hoja de ruta viene determinada por nuestro Plan Estratégico. En enero publicamos el primer informe de seguimiento del actual, que es el Plan 2019-2023, y hemos realizado más del 50 % de actividades. Este documento se sustenta en cinco palancas. La primera son los socios, que es nuestra fortaleza. La segunda es la imagen de la sociedad, que también es un tema prioritario. La tercera son las relaciones institucionales;



plicarlos más en la sociedad, que ellos se sientan más partícipes y que el hecho de ser socios y colaborar con nosotros sea un valor añadido a su actividad. No simplemente que aparezca su logo en nuestras publicaciones o en los documentos de difusión de nuestras actividades, sino que realmente sientan que reciben algo de la SEPR.

P: ¿Y hay presencia de gente joven?

R: Es la apuesta que estamos ha-

nosotros no vemos, quizás porque tenemos un modo de hacer más tradicional. Entonces estamos intentando facilitarles la participación en todas las actividades, tanto de la Sociedad como de sociedades afines. Tenemos un programa de ayudas y becas que hemos implementado y hemos establecido una serie de premios para los trabajos fin de grado, el fin de máster y a los mejores trabajos de investigación.

la cuarta la relación con otras sociedades científicas, tanto de ámbito nacional como internacional y, por último, las actividades.

P: ¿Cuáles son esas actividades?

R: Formación y divulgación principalmente. Organizamos cursos para nuestros socios y otros profesionales, diferentes jornadas sobre temas que respondan a los intereses de cada momento y un congreso bienal con la SEFM. El próximo será en abril de 2023 en Oviedo.

Trabajamos muchísimo en temas de divulgación y una de las secciones de nuestra página web es Pregunta a la SEPR y hemos llegado a 1.500 preguntas. Esa es una sección abierta al público y tenemos un grupo de expertos voluntarios trabajando en esa sección para contestar. Han hecho un trabajo extraordinario y han identificado aquellas preguntas que más inquietan a los ciudadanos y una de las áreas temáticas que más inquietud genera son las radiaciones no ionizantes. Todos los temas relacionados con la telefonía móvil y hemos elaborado dos infografías. Una enfocada a centros de formación secundaria y universidades, y otra más enfocada a los medios de transporte. También hemos publicado un decálogo con diez recomendaciones para reducir posibles efectos de la telefonía móvil.

P: *¿El transporte por qué?*

R: No por las radiaciones que emita el propio transporte sino por la acumulación de usuarios. En el autobús, el metro o el tren. Yo a veces hago en el metro un *screening* rápido y cuento las personas que no van mirando el móvil. Antes contaba las que miraban el móvil, pero ahora tardas menos contando las que no lo miran. Se trata de llamar la atención, porque hay mucha gente que vive pegada al móvil.

P: *Creía que las radiaciones no ionizantes no eran su objetivo.*

R: Sí, la SEPR cuenta con un grupo de trabajo de radiaciones no ionizantes. Y se trabaja también en colaboración también con el Grupo de No Ionizantes de IRPA y con el área temática correspondiente de la plataforma PEPRI, que compartimos con el Consejo.

P: *Pero ningún estudio ha detectado que las ondas de radio tengan efectos sobre la salud.*

R: No hay evidencias científicas, pero tampoco hay evidencias de que sean absolutamente inocuas. En ningún



momento decimos que no se utilice el móvil, que es una herramienta fundamental, no sólo de comunicación, sino de trabajo y ocio. No podemos renunciar al móvil, pero sí hacer un uso adecuado. Hemos presentado estos documentos en una reunión que hemos tenido en el Ministerio de Sanidad hace unas sema-

“Un 30 % de las pruebas médicas radiológicas no aportan información relevante y podrían evitarse”

nas y la acogida ha sido extraordinaria. Nos han pedido esos documentos porque los van a difundir en las diferentes consejerías de sanidad y en otras sociedades científicas.

P: *En cualquier caso, responde a una preocupación que existe en la sociedad. ¿Existe la misma preocupación social por las radiaciones ionizantes?*

R: Sí, sí. Tú planteabas el tema de la radiofobia, que es un miedo irracional a las radiaciones. El doctor García Bernardo, jefe de psiquiatría del Hospital Gregorio Marañón, decía que la radiofobia se cura con una información veraz, clara y autorizada. Un médico debe explicar al paciente el equilibrio entre los beneficios y los riesgos de la radiación. Tenemos una subvención del Consejo de Seguridad Nuclear para llevar a cabo un proyecto para elaborar diferentes pósters enfocados a medicina nuclear, pediatría y radiodiagnóstico y protección radiológica en estos sectores. Son mensajes sobre qué no se debe hacer y de medidas de protección. Pero son tres frases, nada de un texto, sino que con una inspección visual cualquier persona lo identifique y tranquilice a ese padre que va con el niño al hospital, porque le van a hacer una prueba.

P: *Aún así, no es sencillo eliminar esa prevención.*

R: Indudablemente no es un tema fácil. Y mucho más difícil aún convencer a la población de un pueblo donde se va a poner un almacén temporal de residuos, cuyo riesgo radiológico es mínimo.

P: *Y desde el punto de vista contrario a la radiofobia: uno va al médico y le dice*

“Con otras sociedades afines tenemos complicidad, no competencia”

P: ¿Cómo son las relaciones con el CSN?

R: La relación con el Consejo ha sido y es extraordinaria. Yo entré a formar parte de la Junta Directiva (de la SEPR) hace 12 años como secretaria general. En aquel momento el director técnico del Consejo era Juan Carlos Lentijo y pusimos en marcha unos foros de protección radiológica en el sector industrial y con las UTPR. Previamente se había constituido el Foro de PR en el sector sanitario. La colaboración se ha plasmado en un convenio marco que hemos firmado en marzo del año pasado. Ahora estamos trabajando para firmar un acuerdo específico para llevar a cabo una serie de tareas de divulgación propuestas por el propio organismo. Tenemos una estrecha colaboración con la dirección técnica de PR y tuvimos una reunión con su responsable, Javier Zarzuela, a principios de año para identificar puntos de encuentro entre el Plan Estratégico del Consejo y el nuestro. Y también con la consejera Elvira Romera, que preside la Plataforma PEPRI. Coincidí con ella en la clausura de las Jornadas de Calidad Ambiental en Málaga y me proponía más iniciativas de las que podemos asumir, así que le dije que iríamos sacándolas poco a poco. No hay que olvidar que nuestro trabajo en la Sociedad es voluntario. Esto muestra que el Consejo cuenta con la SEPR.

P: ¿Con qué otras organizaciones tenéis relación?

R: Tenemos varios convenios de colaboración con sociedades nacionales afines. Hemos firmado un convenio de colaboración con la Sociedad Española de Física Médica,

con la que tenemos un vínculo especial. La diferencia fundamental es que sus socios pertenecen a un sector profesional concreto, mientras que nuestra sociedad es multidisciplinar. Pero tenemos muchísima complicidad, nada de competencia. Su actual presidente, Damián Guirado, es una persona extraordinaria, con una gran capacidad de construir. Estamos organizando una jornada de seguridad del paciente con diferentes sociedades científicas implicadas en esta materia y contamos con su colaboración. Lo mismo ocurre con otras sociedades, y asociaciones como SERAM, AETR y SEGRA. Además tenemos convenios de colaboración con la Sociedad Española de Oncología Radioterápica (SEOR), con la Sociedad Nuclear Española (SNE) y con la Sociedad Española de la Biología Médica. Acabamos de publicar conjuntamente unos documentos para transmitir un consenso europeo relativo al uso de blindajes plomados sobre pacientes en determinadas exploraciones.

P: ¿Y con instituciones internacionales?

R: En febrero de 2021 firmamos un convenio de colaboración con el OIEA. Estamos muy bien posicionados en IRPA y hemos ganado la candidatura para organizar el congreso IRPA 17 en Valencia, en 2027, que tiene que ser refrendada en el Congreso IRPA 16, que será en Orlando. En cuanto a la ICRP, tenemos tres representantes españoles en la Comisión y varios socios participan en grupos de trabajo. Y también estamos haciendo una apuesta importante de colaboración con América Latina y vamos a actualizar el acuerdo de 2010 con la Federación de Radioprotección de América Latina y el Caribe. D

que se tiene que hacer un TAC o una radiografía y nunca le pregunta cuántas radiografías lleva hechas ese año.

R: Bueno, el médico prescriptor lo sabe porque está en la historia clínica de cada uno. Indudablemente si ve que ya se han realizado más pruebas diagnósticas de las que serían adecuadas, se cuestionará y valorará si es conveniente realizar otras o no. Cualquier trabajo que utilice radiaciones ionizantes debe estar sometido a ese marco del principio básico de la justificación, que en el área sanitaria es un principio fundamental.

P: ¿No tiene la impresión de que se hacen demasiadas radiografías?

R: Somos conscientes de que hay que hacer un uso racional de los procedimientos médicos. Hasta un 30 % de las pruebas radiológicas solicitadas no aportan información relevante y muchas podrían haberse evitado. Ahora bien, yo confío plenamente en el buen hacer de los profesionales médicos y estoy segura de que ellos se mueven bajo el criterio de justificación. Estamos organizando una jornada de protección radiológica del paciente para dar a conocer todas las estrategias que los hospitales en España

están llevando a cabo para fomentar la justificación, para prevenir la repetición de pruebas innecesarias. Llevamos desde 2012 trabajando de manera constante en esa línea de protección del paciente, con notas técnicas sobre el tema.

P: A lo largo de la historia la ICRP ha ido recomendando límites de dosis cada vez más estrictos. ¿Cómo está actualmente la situación?

R: La Comisión Internacional de Protección Radiológica para emitir sus recomendaciones tiene en cuenta los informes emitidos por la UNSCEAR, que es el organismo encargado de los

biológicos radioinducidos y depende de Naciones Unidas. Yo formo parte de la representación española con Ana Hernández, que es la jefa de Gabinete de la Dirección Técnica de Protección Radiológica del Consejo. UNSCEAR publica informes todos los años en base a los nuevos conocimientos científicos. Sobre esos conocimientos se van actualizando las recomendaciones que hace.

P: *Siempre a la baja.*

R: Claro, si hay evidencias de que es preciso reducir el límite. Las últimas recomendaciones contemplan la reducción de límite de dosis significativas para el cristalino, porque se han acumulado durante años evidencias de que los especialistas de radiología intervencionista recibían una dosis significativa en los ojos, por la posición en la que trabajan, y se habían identificado una serie de efectos deterministas.

P: *¿Con qué rapidez se aplican las recomendaciones de ICRP?*

R: Como su nombre indica, no son de obligado cumplimiento, esas recomendaciones tienen que ser recogidas en la normativa. Las últimas, las de la ICRP 103, están recogidas en la Directiva 2013. Y aunque el Reglamento de Protección de la Salud todavía no se ha publicado, desde el momento en el que se aprobó la directiva las instalaciones ya adecuaron sus medidas de protección al nuevo sistema de limitación de dosis.

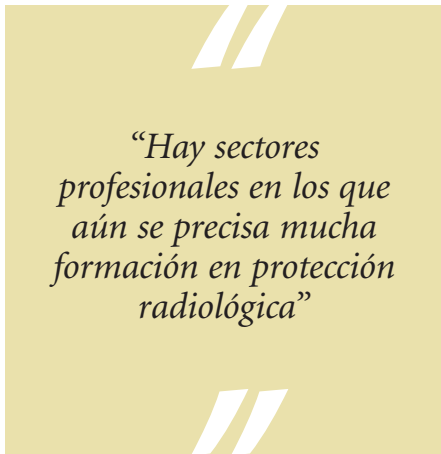
P: *¿Se investiga también en protección radiológica en España?*

R: Este es también uno de los objetivos de esta Sociedad, impulsar la investigación en protección radiológica. De ahí surge la constitución de la plataforma PEPRI, en la que tenemos un papel muy activo y ostentamos la Secretaría General, y que tiene diez áreas temáticas abiertas. Y quiero agradecer la implicación de la consejera Elvira Romero para impulsar esta plataforma. Se llevan a cabo muchas líneas de investi-

gación, tanto en el Ciemat como en otros centros de investigación, universidades y hospitales.

P: *¿Son conscientes los trabajadores de los peligros de las radiaciones ionizantes y adoptan las medidas adecuadas de protección radiológica o tienden a relajarse?*

R: Yo diría que en general sí, porque se llevan a cabo muchísimos programas de formación. Ahora bien, hay sectores profesionales en los que se precisa todavía más desarrollo formativo, porque en ocasiones, aunque un trabajador tenga esa formación, las prisas llevan a bajar la guardia y dar lugar, como ha ocurrido, a pequeños incidentes radiológicos. Los



“Hay sectores profesionales en los que aún se precisa mucha formación en protección radiológica”

mensajes se transmiten de forma permanente y eso hace que se les vaya restando importancia. Por eso hemos puesto en marcha un proyecto para reforzar esa cultura de seguridad en las instalaciones. La SEPR está impulsando la cultura de seguridad en los diferentes sectores profesionales.

P: *¿Se cumple el criterio ALARA?*

R: Desde luego, trabajar por la optimización que es lo que pretende el concepto ALARA, es el objetivo de todos los que nos dedicamos a la protección radiológica. En esto juega un papel fundamental la cultura de seguridad y en el sector nuclear está muy arraigada. También se está empezando a integrar en el sector sanitario, pero ahí tenemos

aún que trabajar más; y es preciso desarrollarla en el sector industrial. Pero ALARA es un concepto que no acaba nunca, siempre hay margen de mejora.

P: *Sobre la sección Pregunta a la SEPR ¿cuándo se puso en marcha y cuántas preguntas reciben?*

R: Se puso en marcha entre los años 2011 y 2012 y recibimos entre 30 y 35 preguntas al mes; es decir, se atiende como mínimo una pregunta al día. Ahora, como hemos detectado preguntas que se repiten nuestros expertos han elaborado unas respuestas que están disponibles en la web. Esta sección nos ayuda a identificar qué les preocupa y qué les interesa tanto a los profesionales como al público y decidir qué actividades y cursos programar.

P: *¿Qué temas son más demandados?*

R: Recibimos muchísimas de pacientes, personas que se van a hacer una prueba diagnóstica o someterse a un tratamiento con radiaciones ionizantes. Y depende también del momento. Por ejemplo, cuando empezó la guerra de Ucrania nos preguntaban por la seguridad de sus centrales nucleares.

P: *¿Es consciente la sociedad de la presencia de la radiación natural en su entorno?*

R: Tenemos un grupo de trabajo también de radiación ambiental y organiza unas jornadas bienales; la última en el mes de junio en Málaga. Es uno de los temas en los que hacemos divulgación. Y tenemos un grupo de trabajo dedicado al radón que ha elaborado una presentación divulgativa sobre sus posibles riesgos, que está publicada en nuestra página web. Y, por supuesto, ofrecemos nuestra disposición para participar en el desarrollo del Plan Nacional de Radón que elabora el Ministerio de Sanidad y está prácticamente terminado, esperando a que se apruebe el Reglamento de Protección de la Salud. ©



La pandemia eterna

Covid persistente y otras secuelas producidas por el SARS-Cov-2

La aparición de la covid-19 ha cambiado nuestras vidas en muchos aspectos. Miles de personas han perdido seres queridos; otras muchas han padecido la enfermedad de forma grave, incluso pasando largos periodos en una UCI. El resto lo ha pasado como una gripe fuerte, como un simple catarro o apenas se han enterado del paso del virus por su organismo y pocos son los que aún no han contraído la enfermedad. Pero el virus ha dejado su rastro en muchas personas de formas distintas, con las

secuelas de una larga estancia hospitalaria, con los efectos sobre la salud mental de los confinamientos y el miedo a los contagios o sufriendo todavía de manera permanente algunos de los síntomas más graves de la enfermedad. Es lo que se denomina covid persistente, un fenómeno que ha sorprendido a los profesionales y para el que se busca una explicación y tratamientos adecuados para eliminar la enfermedad definitivamente.

■ Texto: **Noemí Trabanco** | Periodista de ciencia ■

Alicia Ruiz ha pasado más de dos años peregrinando de especialista en especialista para tratar su covid persistente. Se infectó con el virus durante la primera ola y pasó la enfermedad, como tantos otros, como una gripe bastante fuerte. Los primeros síntomas de la infección fueron evolucionando a otros, como debilidad incapacitante, ma-

reos, dolores en las piernas, mialgias... La médica internista que la atendió a través de una consulta privada fue la primera que le habló sobre covid persistente. Una reinfección posterior la llevó a desarrollar una neumonía y a raíz de ello, el resto de síntomas empeoraron, especialmente desde el punto de vista neurológico y cognitivo y de tracto digestivo. Todo ello

la llevó a estar un año y medio de baja. Ahora ha vuelto a trabajar, aunque sigue presentando un gran número de síntomas. Actualmente forma parte de estudios clínicos en diferentes especialidades y hospitales de la Comunidad de Madrid.

Tras los primeros meses de pandemia, empezaron a surgir los primeros casos de pacientes covid cuyos síntomas

no llegaban a desaparecer o derivaban en otros. En diciembre de 2021 el Grupo de Trabajo en Condición Post-covid de la OMS, liderado por Joan B. Soriano, del Hospital de la Princesa de Madrid, ofrecía una primera definición de la covid persistente en una publicación en la revista *Lancet Infectious Disease*. La enfermedad se define como “la condición que ocurre en individuos con antecedentes de infección por SARS-CoV-2, con síntomas que duran al menos 2 meses y no pueden explicarse con un diagnóstico alternativo. Los síntomas incluyen, entre otros, fatiga, dificultad respiratoria y disfunción cognitiva, y generalmente tienen un impacto en el funcionamiento diario. Los síntomas pueden ser de nueva aparición después de la recuperación tras un episodio agudo de covid-19 o persistir desde la enfermedad. También pueden fluctuar o recaer con el tiempo”.

Uno de los problemas para el diagnóstico es que la sintomatología es muy variada: se han descrito hasta 200 síntomas, aunque algunos son muy comunes, como astenia incapacitante, niebla mental (dificultad para mantener la atención y concentrarse y funciones ejecutivas alteradas), cefaleas, dolores, alteraciones gastrointestinales... Los expertos señalan que es muy importante diferenciar entre lo que son las secuelas post-covid y el covid persistente (CP). En el primer caso, la enfermedad como tal deja de existir en algún momento, mientras que en el segundo no se llega a superar la enfermedad en ningún momento. Aunque se acumula mucha información científica sobre este síndrome, es evidente que desconocemos aún mucho sobre sus causas y su tratamiento.

Entre los proyectos de investigación que se realizan en España, y en los que colaboran muchos de los pacientes diagnosticados, están el de la investigadora Mayte Coiras, del Centro Nacional de

Microbiología (Instituto de Salud Carlos III) sobre las características inmunitarias de la enfermedad o el que desarrollan Manuel Fresno y María Úbeda en el Centro de Biología Molecular (CBM), sobre la relación de la reacción del sistema inmunitario frente a la proteína ACE2 (la que utiliza el virus para entrar en nuestras células) como posible causa de la CP. ACE2 interviene en el metabolismo de la angiotensina II, componente del sistema de regulación de la presión sanguínea y la homeostasis. “Nuestros resultados



De izquierda a derecha, María Úbeda, Manuel Fresno y Carmen Maza, del CBM.

muestran niveles extremadamente bajos de ACE2 en el suero de los enfermos de covid persistente comparado con individuos que se han recuperado con normalidad de la infección vírica, al tiempo que confirman la presencia de autoanticuerpos frente a la proteína”, explica María Úbeda. “Todos estos datos en conjunto parecen indicar que existe una alteración en el sistema RAS/Angiotensina producida por la infección viral y podría explicar la persistencia de los síntomas”, añade.

Según algunos estudios realizados hasta el momento, se estima que aproximadamente un 10 % de los pacientes que han pasado la covid-19 desarrollan este síndrome. Las estadísticas realiza-

das sobre factores de riesgo indican que las mujeres entre 30 y 50 años y que padezcan más de tres síntomas durante la infección aguda por el virus son el grupo de población con mayor riesgo. Esto podría deberse a un trasfondo inmunitario de la enfermedad (las enfermedades inmunitarias son más frecuentes en mujeres) y podría existir alguna repercusión de tipo hormonal. Asimismo, aunque parece que las infecciones durante las primeras olas han generado los afectados de ma-

yor intensidad, pacientes de olas posteriores también están desarrollando covid persistente.

Atención sanitaria

Actualmente no hay aún un registro nacional de pacientes CP, por lo que estimar el número de afectados es complicado. Sólo en la Co-

munidad de Madrid han sido diagnosticados unos 2000. “El recuento que se está haciendo de la situación no es el adecuado”, indica Pilar Rodríguez Ledo, vicepresidenta primera de la Sociedad Española de Médicos Generales y de Familia (SEMG). Esta sociedad fue la primera en elaborar una Guía Clínica para la atención al paciente CP, con el objetivo de que la atención primaria de estos pacientes sea eficiente. “Para que se siga desde los dispositivos asistenciales del sistema sanitario español tiene que llevar el reconocimiento del Ministerio, y hasta el momento no lo tenemos. Sigue faltando apoyo institucional para el tratamiento de la enfermedad. Entendemos que no es un rechazo a la guía, pero

parece que se trata de no evidenciar una realidad”, indica Rodríguez Ledo.

Desde la SEMG y bajo el paraguas de la recién aparecida Red Española de Investigación en Covid Persistente (REiCOP), formada por 57 entidades de profesionales, científicas y de pacientes, están desarrollando una aplicación móvil que facilite el uso diario de la guía en atención primaria, trabajan en la actualización de la guía y llevan a cabo proyectos de investigación para entender las causas de la enfermedad y mejorar los tratamientos. “Queremos mejorar el abordaje que hacemos de los pacientes, desarrollando herramientas de valoración integral más allá de la suma de sus síntomas”. Para ello la SEMG cuenta con la colaboración de los pacientes afectados, como es el caso del proyecto MARCO-19, junto a la plataforma LongCovidACTS, en el que trabajan en la actualización de la Guía de Atención al paciente y la realización de estudios clínicos sobre la enfermedad y el seguimiento de pacientes CP.

Los colectivos de pacientes de diferentes comunidades autónomas, que se formaron con los primeros afectados, han sido indispensables para buscar soluciones y solicitar una mejor atención a los servicios de sanidad autonómicos y estatales. “La atención depende mucho de la comunidad autónoma en la que vives y existe aún mucha desinformación entre los profesionales sanitarios. Además, si en su momento no tuviste acceso a una PCR para diagnosticar la infección, es muy difícil que luego te diagnostiquen como CP”, cuenta Beatriz Fernández, paciente y portavoz del Colectivo Covid Persistente de Madrid, que no fue diagnosticada como tal hasta que se trasladó de Madrid a Barcelona. Las principales reclamaciones de



Pilar Rodríguez Ledo, vicepresidente de la SEMG.

estos colectivos están relacionadas con una atención más personalizada, una mayor comprensión de los profesionales sanitarios y una revisión de las condiciones de las bajas laborales y de enfermedad profesional.

En el Hospital Germans Trias i Pujol de Badalona se creó en 2020 la primera unidad de tratamiento específica para pacientes CP. Recientemente se ha aprobado un plan

piloto para aplicar su protocolo en la atención primaria de la zona metropolitana norte de Barcelona. Silvia Soler es una de las pacientes tratadas en esta unidad. Ella también ha pasado por un periplo desde su infección inicial en marzo de 2020, llegando a desarrollar neumonía, fuertes do-

lores musculares, niebla mental y afonía, entre otros. A partir de septiembre de 2020 algunos síntomas como la afonía se mantenían y aparecieron otros, como acúfenos, conjuntivitis recurrente, fatiga muy incapacitante y síntomas neurológicos como olvidarse de palabras y dificultad para leer y realizar su trabajo habitual. Esto la llevó a no poder apenas moverse ni hacer una vida normal. Su diagnóstico como CP tuvo que esperar meses. Actualmente se encuentra en diferentes ensayos clínicos que se están desarrollando en el hospital.



Silvia Soler, paciente de CP.



Equipo de covid persistente pediátrico del Hospital Germans Trias i Pujol.



Según algunos estudios la covid persistente afecta a un 10 % de los pacientes que sufrieron la infección de forma aguda.

Unidades semejantes han ido apareciendo en otras comunidades autónomas, como Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana o Andalucía. En Asturias, en junio se puso en marcha el ‘Proceso asistencial en personas con condición post-covid’. “Hemos creado un grupo de trabajo multidisciplinar para mejorar los circuitos de asistencia, vertebrándose desde la atención primaria y con comunicación fluida con otros ámbitos asistenciales. Se ha contado con la evidencia científica existente y con los propios afectados”, nos explica M^a Josefa Fernández Cañedo, responsable de la Dirección General que lo ha impulsado. Dentro del protocolo se ha establecido un código de identificación de la enfermedad para que se pueda hacer un mejor registro de los afectados.

Covid persistente en menores

Se estima que entre un 1 y un 5 % de los niños que se han infectado por SARS-CoV-2 sufren CP, aunque algunos estudios apuntan a un porcentaje más alto. Según María Méndez, jefa de Pediatría del Hospital Germans Trias i Pujol, la incidencia en menores es difícil de estimar

ya que la mayoría de estudios se realizan a través de encuestas, lo que puede hacer variar los datos. Además, la propia incidencia de infección por covid es también más difícil de estimar que en adultos. No obstante, según su experiencia la incidencia en menores es “claramente menor que en adultos, probablemente en torno a un 3 %, y es menor en edades más tempranas. También vemos una mayor incidencia en niñas, pero no tan acusada como en adultos”. Según la especialista, la enfermedad presenta una afectación muy similar a la de los adultos, pero el impacto en la vida de estos menores es, probablemente, mayor. “En muchos casos estos niños tienen que dejar de hacer deporte, tener vida social e, incluso, dejar de ir a la escuela. El cuadro más común es la fatiga, dolores de cabeza incapacitantes y niebla mental”. Se trata de pacientes que están en pleno desarrollo físico, social y académico y sufrir la enfermedad les repercute enormemente.

En el hospital cuentan también con una unidad específica para el tratamiento de menores con CP, formada por pediatras de distintas especialidades (cardiólogos, neumólogos, nutricionistas...); un

servicio de rehabilitación; un servicio de rehabilitación neurocognitiva para la niebla mental, realizado a través de un concierto con el Institut Guttmann; y el equipo de salud mental, para dar apoyo a los niños en los que está repercutiendo muy negativamente sobre su vida. “Una vez que los niños son derivados a nuestra unidad desde la atención primaria, un pediatra de la unidad les realiza una primera valoración para ver el grado de afectación, se les realizan diferentes test y exploraciones complementarias para descartar otras posibles patologías y en base a todo esto se busca el programa específico para el tratamiento de sus síntomas. Es bastante personalizado”.

Salud mental tras la pandemia

Otra secuela generada por la pandemia es el incremento de trastornos y enfermedades mentales. En marzo la OMS lanzaba un resumen científico sobre las evidencias existentes hasta ahora de cómo la pandemia ha afectado a nivel mundial en este aspecto. El organismo se hacía eco de la necesidad de mejorar los servicios de atención y de apoyo psicosocial y de que estos servicios se inte-

gren en la cobertura universal de salud y en los planes de respuesta a emergencias de salud pública. Su informe mundial, publicado en junio, apunta a un aumento del 25 % de trastornos afectivos, principalmente depresión o ansiedad, durante el primer año de pandemia. Esto ha afectado fundamentalmente a sectores específicos de la población, como son los profesionales sanitarios, personas afectadas por fallecimiento de familiares por covid, y la población joven.

El Grupo de Trabajo Multidisciplinar sobre Salud Mental en la Infancia y Adolescencia lanzaba en abril de este año un comunicado en el que alertaban de un aumento de hasta un 47% de los trastornos mentales en menores en España, especialmente patologías de conducta alimentaria, trastornos afectivos, conductas autolesivas y suicidio, que en algunos países europeos ha aumentado en gran medida, convirtiéndose en la primera causa de muerte en jóvenes, por encima de los accidentes de tráfico. Según el doctor Celso Arango, del Hospital Gregorio Marañón de Madrid y presidente de la Sociedad Española de Psiquiatría, “sabíamos que habría una ola de problemas de salud mental ligada a la pandemia, pero no supimos predecir que uno de los segmentos de población más afectados iba a ser el de los jóvenes. Tiene que ver con una falta de aprendizaje socioemocional que ayude a gestionar las frustraciones en una edad muy complicada”. Según dice, la pandemia ha dejado al menos una parte positiva, que es la mayor visualización de las enfermedades mentales, ayudado en muchos casos por personajes públicos que han hablado abiertamente sobre sus experiencias. “Esto ayuda a acabar con el estigma y fomenta que deje de ser un tema tabú. Al final el estigma se rompe a base de educación y empatía”, añade.

También en los mayores la pandemia ha incrementado los problemas aso-



El doctor Celso Arango, presidente de la Sociedad Española de Psiquiatría.

ciados con la salud mental. Juan José Martínez Jambrina, jefe del servicio de psiquiatría del área 3 de Asturias, recuerda que las personas mayores han sido los grandes olvidados, pese a ser el grupo donde más impactó la enfermedad en sus primeras etapas. “En una

región como Asturias, donde tenemos una población mucho más envejecida que en otras regiones, esto se nota más. Nosotros tenemos unos cuatro pacientes mayores de 70 años por cada adolescente que tratamos. En muchos casos nos encontramos con pacientes que previa-



La OMS alerta de un aumento del 25 % de los trastornos afectivos tras la pandemia.



El psiquiatra Juan José Martínez Jambrina en su despacho.

mente presentaban deterioros compatibles con la edad y en los que se ha producido un aceleramiento hacia demencias degenerativas”. También han aumentado los casos de cuadros depresivos y ansiosos en este segmento de la población. Martínez Jambrina también tiene entre sus pacientes algunos casos de CP, con personas que llevan meses sufriendo los síntomas de la enfermedad y cuya vida ha cambiado completamente, con situaciones laborales y personales muy comprometidas, que presentan cuadros graves de ansiedad o depresión. “También llevamos algunos casos de pacientes que pasaron mucho tiempo en la UCI o que sufrieron una sintomatología grave y presentan cuadros de estrés postraumático”.

Si la pandemia ha dejado en evidencia un sistema sanitario debilitado, especialmente en cuanto a falta de personal, esto ha quedado especialmente patente en el tratamiento de las enfermedades mentales. España invierte un 5 % de su gasto sanitario en salud mental frente al 7 % de la media europea, tiene una media

de psiquiatras por habitante un 40 % inferior y carece de una Estrategia de Salud Mental, aunque existen importantes diferencias entre comunidades autónomas. Según Arango “se trata de un tema de priorización. Nuestro país suele apostar más por patologías donde los resultados pueden llegar a corto plazo, porque eso luego se traduce en algo que ‘vender’ políticamente. En el caso de la salud mental esto es más a largo plazo y, por tanto, no les interesa tanto”. Recientemente se ha aprobado un presupuesto de 100 millones de euros durante cinco años “que son bienvenidos, pero esto apenas

se traduce en la contratación de dos psicólogos y dos psiquiatras por comunidad autónoma por año y no disminuye mucho las listas de espera. No hay presupuesto para personal, sino para campañas de información, apps, etc, pero necesitamos enfermeras de salud mental, psiquiatras, médicos clínicos...”, reclama. Muchos pacientes, cansados de no recibir un tratamiento, se van a consultas privadas, si pueden, o ven que su situación empeora por no recibir un tratamiento adecuado a tiempo.

Las pandemias del futuro

Mientras el virus sigue entre nosotros y aparecen nuevas variantes, los científicos tratan de conocer el futuro de esta enfermedad y las principales causas que originen nuevas pandemias en el futuro. En cuanto al SARS-CoV-2, las hipótesis sobre su evolución son varias. Algunos sugieren que el virus evolucionará hacia una menor virulencia, pero otros expertos lo dudan. El futuro del SARS-CoV-2 sigue teniendo múltiples incógnitas.

Mecanismos causantes de covid persistente

Persistencia viral: en algunos pacientes CP se ha detectado proteína viral hasta 15 meses después de la infección, en reservorios intestinales. También puede ocurrir en órganos que ajenos a la entrada/salida del virus, como la retina.

Exceso de inflamación: parece ser el mecanismo principal causante de CP. Se ha identificado una hiperrespuesta inmune citotóxica persistente.

Respuesta autoinmune: muchos de estos pacientes muestran un elevado número de autoanticuerpos.

Estos tres mecanismos están relacionados y los expertos creen que la combinación de diferentes proporciones de ellos da lugar a distintos perfiles sintomatológicos. ▶

En lo que sí están de acuerdo la mayoría de los científicos es que las zoonosis (enfermedades que pasan desde animales al ser humano) serán las principales causas de futuras pandemias y tenemos que estar preparados. Esta pandemia ha evidenciado muchos aspectos que se deben abordar para poder afrontar futuras emergencias sanitarias de una forma más eficaz. Consciente de ello, la OMS ha comenzado a trabajar en la elaboración de un tratado internacional sobre prevención y preparación ante pandemias, pero deberán ser los gobiernos los que tengan que hacer sus deberes para hacer frente a las carencias en sus sistemas sanitarios, la financiación de la ciencia y los cambios sociales necesarios para afrontar los futuros retos. ©



El Sistema Internacional de Medidas se completa con la definición del kilogramo a partir de la constante de Planck

La importancia del tamaño

El 20 de mayo de 2019 entró en vigor la nueva definición del kilogramo, la unidad de masa del Sistema Internacional de Unidades, tras su aprobación, en noviembre de 2018, por unanimidad de los 60 países representados en la XXVI Conferencia General de Pesos y Medidas. La nueva definición depende ahora de una constante de la naturaleza, la de Planck. Hasta entonces remitía a un patrón físico, un cilindro de platino-iridio conservado en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas,

situada en las afueras de París. El kilo era la última de las siete medidas fundamentales del Sistema Internacional cuyo valor aún dependía de un prototipo. Aunque pueda parecer una mera anécdota, la adopción ha supuesto un avance de suma importancia, ya que numerosas actividades, algunas de ellas muy sofisticadas, pero también otras cotidianas y universales, como el GPS, necesitan la máxima precisión en las mediciones.

■ Texto: **Mónica Salomone** | periodista de ciencia ■

“**E**s algo que está debajo de todo, sosteniendo nuestra vida diaria: cuando vamos al supermercado, a la gasolinera... Pero ¿no nos damos cuenta de su importancia!”, dice enfático Emilio Prieto, jefe del Área de Longitud

e Ingeniería de Precisión del Centro Español de Metrología (CEM), en Madrid. “Además, es fundamental para el avance de la ciencia”. Se refiere a nuestra capacidad de medir el mundo; de determinar lo que pesan, ocupan y tardan las cosas

y los sucesos, y de hacerlo de manera precisa y estandarizada. Damos por hecho, como dice Prieto, que un kilo de lentejas, un litro de gasolina o los 9,58 segundos del récord de los 100 metros lisos son tales aquí, en Lima y en la An-

tártida. Pero que en efecto lo sean es en realidad un logro de la civilización, el fruto del empeño de muchas personas a lo largo de varios siglos, y está en la base del contrato social.

La economía, el avance tecnológico, la medicina, nuestra visión del cosmos—con su mecánica cuántica reinando a escalas atómicas y subatómicas; con sus ondas gravitacionales; con su relatividad— dependen del poder humano de medir magnitudes de manera cada vez más precisa, y de poder compartir esas medidas con congéneres que conocen su valor. Así que no es extraño, dada su importancia, que el Sistema Internacional de Unidades, abreviado SI, comparta origen con el Estado moderno.

“Los orígenes del sistema métrico decimal se encuentran en Francia”, escribe en la Revista Española de Metrología Estefanía de Mirandés, física de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés). “A pesar de los repetidos intentos de Carlomagno y diversos reyes posteriores de reducir el número de unidades de medida, en 1795 Francia contaba con más de setecientas unidades diferentes”. La palma, el pie, la vara, el codo... variaban de una ciudad a otra, no tenían relación entre sí y sus divisiones no eran homogéneas. “Todo ello dificultaba enormemente los cálculos en la vida cotidiana, introducía errores y era fuente de engaños”, explica De Mirandés. Los cuadernos de quejas —peticiones cuyo debate solicitaba el pueblo francés a las asambleas de los Estados Generales— “recogían numerosísimas reclamaciones de unidades de medida universales”.

El proceso para escoger estas unidades y determinar su valor con precisión es un relato de aventuras y perseverancia que todavía no ha concluido. Es más, quizás no acabe nunca, porque como afirma Prieto “la investigación no des cansa, y necesita cada vez más precisión, menos incertidumbre”.

Al principio fue el metro

La unidad pionera, la que marca el inicio de construcción de un sistema internacional de medidas, es por supuesto el metro. Oídas las quejas ciudadanas, reunidos los científicos, el 26 de marzo de 1791 nació el metro como la diez milonésima parte de un cuarto del meridiano terrestre, definido este a su vez como un círculo completo alrededor de la Tierra. Quedaba, claro está, la nada fácil tarea de medir un cuarto del meridiano. “Ello dio lugar a una fascinante odisea llevada



El físico alemán Max Planck.

a cabo por dos expertos en geodesia que recibieron el encargo de la comisión: Pierre-François Mechain y Jean-Baptiste Delambre”, cuenta De Mirandés. Su periplo llevó siete años y fue todo menos aburrido: hubo “arrestos, revocaciones temporales e incluso destrucción parcial de sus resultados geodésicos, ya que sus actividades suscitaban el recelo de la población”, prosigue.

El SI sigue hoy en construcción. Uno de los últimos hitos en el empeño humano por medir la realidad se produjo hace apenas unos años, el 20 de mayo de 2019. Hasta entonces el kilogramo oficial había

sido un cilindro de platino e iridio apodado el gran K, conservado desde su creación en 1889 bajo tres llaves en la sede del BIPM, a las afueras de París. Pero ese día el kilo perdió su entidad material, palpable, para convertirse en un concepto, un valor que puede ser hallado cada vez que sea necesario porque solo depende de una constante de la naturaleza, la constante de Planck, abreviada como h .

El kilogramo fue la última de las unidades del sistema internacional en estar definida no por un objeto, sino por un fenómeno físico que genera una medida inmutable a lo largo del tiempo. Son siete unidades —siete pilares que dan soporte a toda la estructura económica, social, científica, médica, tecnológica—, y desde mayo de 2019 todas ellas están definidas a partir de constantes de la naturaleza.

La votación en que representantes de sesenta países se manifestaron a favor de esta redefinición del SI, el 16 de noviembre de 2018 en la Conferencia General de Pesas y Medidas en Versalles, fue “un momento histórico en el progreso científico”, declaró entonces Martin Milton, director de la BIPM. “Utilizar las constantes fundamentales que observamos en la naturaleza como fundamento de conceptos importantes, como la masa y el tiempo, nos da una base estable para avanzar en nuestra comprensión científica, desarrollar nuevas tecnologías y abordar algunos de los mayores desafíos de la sociedad”.

El kilogramo, pues, depende de la constante de Planck (h), un valor expresado en una combinación de unidades que incluye la masa. El amperio, la unidad para la corriente eléctrica, está en relación a la carga elemental, la del electrón; el kelvin, para la temperatura, depende de la constante de Boltzmann; el mol, que mide la cantidad de sustancia, utiliza la constante de Avogadro; el metro, la unidad de longitud, se define a partir de la velocidad de la luz en el vacío; y la can-

del, que mide la capacidad de iluminar de una fuente dada y que es la unidad básica de la fotometría, depende de la radiación monocromática de una frecuencia determinada.

Falta por nombrar el segundo, la unidad de tiempo, que funciona como una unidad para dominarlas a todas. Porque, una vez adscritas las unidades a constantes fundamentales, el segundo interviene en la determinación de todas ellas, con la excepción del mol. Esto quiere decir que las definiciones de la longitud, la corriente, la temperatura e incluso el kilo dependen del segundo. El metro, por ejemplo, se define como la distancia que recorre la luz en el vacío durante una 299.792.458 parte de segundo.

El tiempo es cesio

Y, ¿qué es el segundo? Hasta mediados del siglo pasado fue simplemente la fracción $1/86400$ de un día, “y el concepto de día se consideraba conocido por todos”, según De Mirandés. El reloj atómico, inventado en 1945, cambió la situación. Basados en el tiempo que tardan los átomos de cesio en cambiar su estado de energía cuando se los bombardea con microondas, los relojes atómicos logran medir el tiempo en attosegundos —la trillonésima parte de un segundo—. Ese grado de precisión permitió descubrir que con la definición tradicional de segundo la duración de un día aumentaba en 1,7 milisegundos cada cien años, así que en 1967 el segundo atómico se impuso: desde entonces un segundo equivale a 9.192.631.770 ciclos de un átomo del isótopo cesio 133, donde cada ciclo corresponde a un cambio de energía atómico. Los relojes atómicos generan hoy el Tiempo Atómico Internacional y son un elemento imprescindible para cosas tan dispares como el GPS y las transacciones económicas globales.

El proceso de redefinición del SI desde luego no es fruto de un capricho.

Como dice De Mirandés, “la intención de redefinir el kilogramo respecto a una constante fundamental de la naturaleza ha estado presente en el pensamiento de muchos científicos desde Maxwell [el célebre físico autor de las ecuaciones que describen los fenómenos electromagnéticos], quien así lo expresó en 1870”.

Los metrologos, que velan por la integridad de las unidades del SI, han buscado para cada una de ellas una constante, sabiendo que así preservan su valor para la humanidad, por los si-



Sede de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Saint-Cloud de Sèvres, Francia.

glos de los siglos. Para muestra, volvamos al kilogramo. Cuando se definió ‘el gran K’ como prototipo se distribuyeron copias suyas a los países firmantes del tratado del metro, y seis de ellas quedaron en el BIPM para compararlas periódicamente con el prototipo. Desde 1889 se han llevado a cabo tres de estas comparaciones.

“En las dos primeras, en 1946 y en 1991, se pudo constatar que las copias habían sufrido variaciones de masa respecto al prototipo internacional, con un valor medio de 30 microgramos”, explica De Mirandés. En cambio, en la última verificación, en 2014, las copias casi no habían variado su masa con respecto a K, lo que podría explicarse por las mejoras en las condiciones de conservación de los prototipos: los microgramos de más o de menos dependen de la manipulación o de la exposición del material al polvo. Pero claro, la ciencia no puede depender de la limpieza de un prototipo.

William Phillips, Nobel de Física e investigador del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus





La medida de las radiaciones ionizantes

Las siete unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades son los colores primarios de la metrología: con ellas se obtienen numerosas unidades derivadas, como el hercio (frecuencia); el Newton (fuerza); el Julio (energía, trabajo y calor), el Pascal (presión), etcétera. Los organismos responsables de salvaguardar todas estas unidades en cada país trabajan en coordinación con la Oficina Internacional de Pesas y Me-

tanto "la validez de todas las mediciones realizadas en España como su compatibilidad con las realizadas fuera de nuestras fronteras, aspecto básico para el reconocimiento internacional de nuestros intercambios comerciales y de nuestras contribuciones científico-técnicas".

Uno de los laboratorios asociados al CEM es el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del

didas. En nuestro país, el Centro Español de Metrología (CEM) se ocupa específicamente de las unidades de longitud, masa, temperatura y electricidad, y cuenta con seis laboratorios asociados.

Esta infraestructura metroológica hace posible "la disseminación de las unidades de medida por todo el país", explica el CEM en su web, "desde el nivel primario hasta las mediciones realizadas en la industria, el comercio, la ciencia, la educación o los servicios (...)". Así se garantiza

siglas en inglés) estadounidense, explicó en 2018 en una conferencia en Barcelona cómo se han alcanzado las nuevas definiciones de las unidades. El autor de la correspondiente crónica en el diario *El País* cuenta que Phillips tomó una réplica del prototipo del kilo y dijo, mostrándola al público: "Si ensucio esto con mis manos, automáticamente pesaréis todos menos. Esto hay que arreglarlo".

A más precisión, más conocimiento

Bromas aparte, lo cierto es que nadie haría dieta por unos microgramos de más o de menos. Pero la redefinición de las unidades del SI en función de constantes físicas tendrá consecuencias. "Así como la redefinición del segundo en 1967 proporcionó la base para la tecnología que ha transformado la forma en que nos

comunicamos en todo el mundo, a través del GPS e internet, los nuevos cambios tendrán un gran impacto en la ciencia, la tecnología, el comercio, la salud y el medio ambiente, entre muchos otros sectores", proclamó el BIPM al anunciar en 2018 la revisión del SI.

El detector de ondas gravitacionales LIGO capta desde 2012 las vibraciones que producen en el espacio-tiempo algunos sucesos cósmicos enormemente energéticos, como la fusión de dos agujeros negros; pero estas ondulaciones en el espacio-tiempo son tan leves que ni siquiera el físico que predijo su existencia, Albert Einstein, creía que fuera posible percibir las. En los últimos años LIGO lleva acumuladas numerosas detecciones gracias a que sus instrumentos pueden distinguir variaciones miles de veces más pequeñas que el tamaño de

un protón en distancias de varios kilómetros.

Hay muchos más ejemplos de la utilidad de medir con precisión. Emilio Prieto menciona los microprocesadores, los chips, sin ir más lejos: "Tienen componentes de siete nanómetros, algo inimaginable hace poco tiempo, y depende de que podamos medir con esa resolución". También en la medicina abundan las intervenciones cada vez más exigentes en su finura, como la cirugía de cataratas, recuerda Prieto.

La carrera hacia la precisión no ha terminado. "El próximo cambio que se avecina en pocos años va a ser la definición del segundo", dice este experto. "Ahora mismo está basada en la radiación del cesio, pero hay unos diez átomos candidatos capaces de dar frecuencias bien definidas, con incertidumbres de hasta de tres y cua-

Ciemat, que “custodia, conserva y disemina” los patrones nacionales de las magnitudes relativas a las radiaciones ionizantes.

Como explica su director, Miguel Embid, se trata de las unidades de actividad de una sustancia radiactiva, medida en becquerel; de dosis de exposición, medida en culombios por kilogramo; del kerma, que es la energía cinética liberada por unidad de masa y que se mide en gray; de la dosis absorbida —la cantidad de energía depositada por la radiación ionizante en una sustancia—, también expresada en gray; y



Miguel Embid.

de fluencia neutrónica, expresada en neutrones por metro cuadrado y que se refiere a los neutrones que atraviesan un espacio determinado en un tiempo dado. Todas derivan de las siete unidades primarias del SI.

Otra unidad muy empleada es el sievert, que mide el efecto sobre la salud de niveles bajos de radiación ionizante. Como explica Embid, “para medir los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la salud hay que partir de una medida general conocida, que puede ser sobre un material o volumen de aire; con esta medida, y aplicando unos coeficientes, se puede calcular dosis personal o en órganos específicos”. La medida general es el gray. Otras unidades, como el rem y el rad, son antiguas o están fuera del SI.

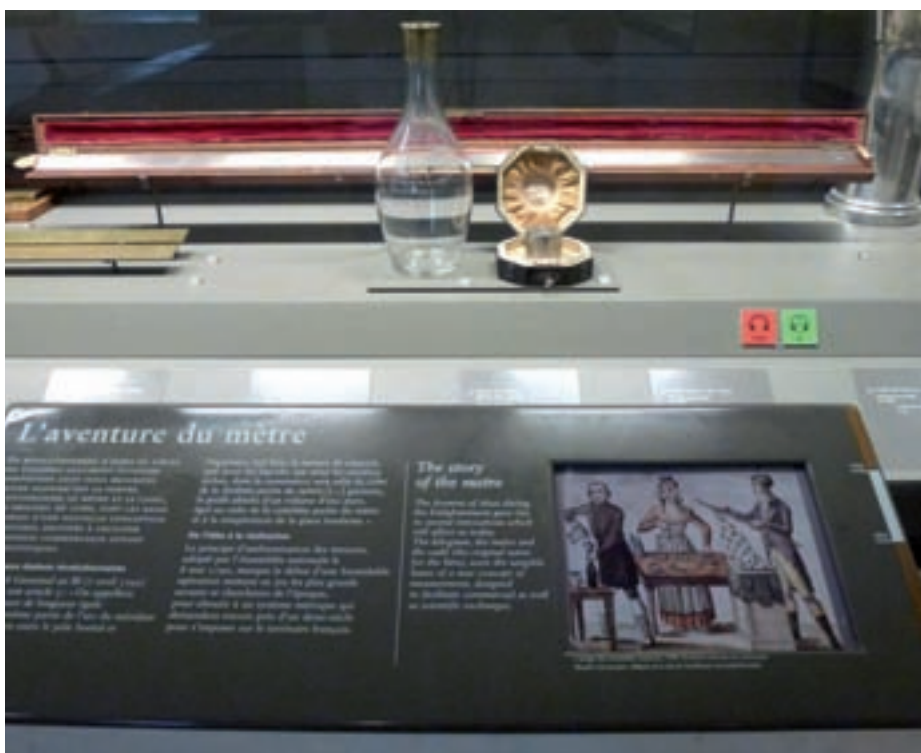
Sin la actividad del LMRI no sería posible garantizar, por ejemplo, que las dosis de radiación que se administran en los hospitales en tratamientos de medicina nuclear son adecuadas; que los equipos de protección personal en las instalaciones nucleares funcionan adecuadamente; o que se está llevando a cabo una correcta vigilancia radiológica ambiental.

También son muchos —recuerda Embid— los procesos industriales que emplean radiaciones ionizantes: las papeleras, en sondas de espesor para medir el grosor de folios y láminas; las plantas de embotellamiento, en medidores de nivel; la industria química, para iniciar las reacciones de polimerización que dan lugar a los plásticos y otros materiales.

Y, además, “también hacemos mucha I+D”, señala Embid. Como en el caso de las demás unidades, el objetivo es avanzar siempre hacia sistemas de medida cada vez más precisos. ▶

tro órdenes de magnitud mejor que el cesio. La realización práctica del segundo, o sea la forma de contar el tiempo, puede que mejore en 1.000, o en 10.000 veces, y como las demás unidades dependen también del segundo, todas mejorarán”.

El Sistema Internacional de Unidades ha demostrado ser uno de los pilares del estado moderno y de la economía globalizada. El 23 de septiembre de 1999 quedó clara su importancia también en la era espacial. Ese día la NASA perdió el contacto con su sonda Mars Climate Orbiter, justo cuando debía recibir la señal de su llegada a Marte. La consiguiente investigación reveló la causa: un fallo humano. Uno de los proveedores de la agencia estadounidense aún seguía el Sistema Imperial de unidades. Una nave escacharrada sobre el planeta rojo fue el precio.



Antiguo patrón del metro, que se exhibe en el Museo de Artes y Oficios de París.

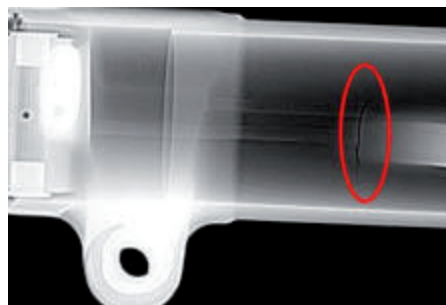
Plan del CSN para mejorar los sistemas de seguridad de los recintos de operación de radiografía y gammagrafía industrial

Una adecuada protección radiológica en las operaciones de radiografía y gammagrafía industrial fija (en búnker) requiere, además de buenos procedimientos de trabajo, que el diseño del búnker incorpore un sistema de seguridad adecuado. Una vez analizadas, a la luz de la normativa internacional y de países de nuestro entorno como Francia, Reino Unido y Estados Unidos, las condiciones de seguridad en el diseño de

los búnkeres de radiografía y gammagrafía existentes en España, el CSN ha aprobado una Instrucción Técnica Complementaria definiendo los requisitos mínimos que estos recintos deben cumplir y los plazos para cumplirlos.

■ Texto: **Laura Urteaga y Belén Tamayo** | consejera técnica y técnica del Área de Instalaciones Radiactivas Industriales, respectivamente ■

La radiografía y gammagrafía industrial son técnicas de ensayo no destructivo destinadas al control de calidad de materiales, muy utilizadas en las industrias siderúrgica, naval, nuclear, petrolera, etc. Se emplean con objeto de identificar y clasificar defectos de soldaduras. La radiografía industrial se realiza con equipos generadores de rayos X o con aceleradores de electrones y la gammagrafía industrial con equipos denominados gammágrafos que incorporan una fuente radiactiva encapsulada emisora de radiación gamma. Habitualmente se utilizan equipos portátiles, que se desplazan al lugar donde se encuentran las piezas a ensayar. A este modo de operación la denominamos *in situ*.



Identificación de defectos.

La gammagrafía *in situ* es la que presenta mayores dificultades desde el punto de vista radiológico, debido a las circunstancias particulares en las que esta actividad se lleva a cabo. Por ello, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha impulsado planes de mejora de esta actividad, abordando los aspectos que inciden en las condiciones de seguridad, como los relativos a:

- El equipo y elementos auxiliares, analizando el programa de revisiones periódicas de los equipos de gammagrafía y sus accesorios por una entidad de asistencia técnica autorizada; las características de los equipos y accesorios que se pueden utilizar y comercializar en España; y las verificaciones y mantenimiento que debe efectuar el usuario sobre equipos y elementos auxiliares. Todas estas medidas tienen por objeto que los equipos en uso en España dispongan de elementos de seguridad y que se encuentren en condiciones adecuadas para su uso.
- La formación del personal de operación, implementando un programa de formación continua.

- Implementar el concepto ALARA, incorporando la planificación de tareas con el objetivo de optimizar la dosis de los operadores,
- Control del desarrollo de las actividades de operadores y ayudantes, a través de un programa de inspecciones en obra a realizar por el supervisor de la instalación.

Además, el CSN ha adoptado medidas para:

Aumentar el control sobre estas instalaciones, entre las que cabe destacar la campaña de inspecciones en obra.

Fomentar la cultura de la seguridad en las instalaciones enviando a los titulares información sobre experiencia operativa y prácticas internacionales.

Otro aspecto relevante surgido en los planes de mejora es el establecimiento de vías de colaboración entre el CSN y el sector de gammagrafía industrial a través del Foro Industrial, creado entre el CSN y la Sociedad Española de Protección Radiológica. Este Foro ha elaborado diferente material de apoyo, a través de distintos grupos de trabajo en los que participan representantes de las instala-

ciones de gammagrafía: el modelo de procedimiento de planificación de tareas para que las instalaciones desarrollen su propio procedimiento, material didáctico para la formación continua del personal de operación, un video de actuación en caso de emergencia en una operación de gammagrafía y dos pósteres en relación con las verificaciones y el mantenimiento que debe efectuar el usuario sobre los equipos y elementos auxiliares de los dos modelos de equipos más utilizados en España. Todo este material está disponible en la web del CSN.

Estos planes de mejora han influido en la reducción de la dosis operacional de estos trabajadores, pero sigue siendo la actividad que en mayor proporción supone dosis a los mismos que superan los límites recogidos en el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes, incluso con valores que llegan a rebasar hasta diez veces este límite. En estas operaciones *in situ* el factor humano es determinante, pues realizar la práctica de forma segura se basa en gran medida en el seguimiento de procedimientos.

Cuando las piezas a radiografiar se trasladan a un recinto blindado, diseñado al efecto, con un sistema de seguridad que impide el acceso cuando hay radiación en su interior, la seguridad de la operación descansa, en gran medida, en el diseño adecuado del blindaje, del sistema de seguridad del recinto y en su correcto funcionamiento, lo que supone una mejora en las condiciones de seguridad en el desarrollo de esta actividad.

Hay operaciones que tienen que ser realizadas *in situ*; por ejemplo, montaje, estructuras y piezas de gran tamaño con dificultad para su traslado... por lo que se deben establecer las condiciones adecuadas para optar por la operación *in situ* o en recinto blindado. Asimismo, por la experiencia operativa se ha constatado la necesidad de implementar mejoras en los sistemas de seguridad para

tener en cuenta el tipo de equipo (rayos X o gammógrafo) y en este último caso si el telemando es manual o automático. Estos aspectos influyen en el diseño del sistema de seguridad.

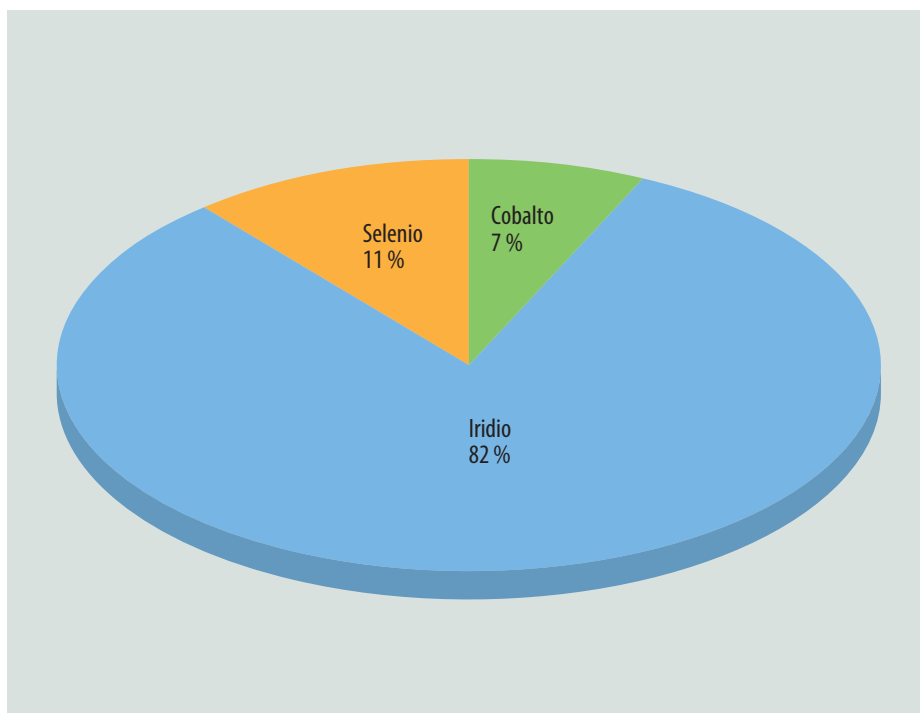
En este artículo se analizan, a la luz de la normativa internacional y lo que se aplica en países de nuestro entorno, los requisitos de los recintos de operación de radiografía y gammagrafía industrial y de los sistemas de seguridad de los mismos, según equipo (rayos X o gammógrafo) y según el tipo de telemando en caso de utilizar gammógrafo (manual o automático), recogidos en una Instrucción Técnica Complementaria a la autorización de las instalaciones radiactivas de radiografía y gammagrafía industrial, que fue aprobada por el Pleno del CSN el 8 de septiembre de 2021 y remitida a todas las instalaciones radiactivas autorizadas del sector el 15 de septiembre de 2021. Estos requisitos son de aplicación para los nuevos recintos y las instalaciones ya existentes disponen de un plazo de dos años para presentar la documentación justificativa.

Equipos de radiografía y gammagrafía industrial

En base a las características de los equipos se pueden implementar diferentes funciones en el circuito de seguridad de los búnkeres de operación.

Los equipos de rayos X convencionales que se utilizan para radiografía industrial son equipos portátiles, que constan de un tubo de rayos X (contenido en una estructura de protección), generador de alta tensión y consola de control, que se conecta con el generador de alta tensión. La estructura de protección, donde se aloja el tubo, cuenta con una ventana por la que se emite el haz útil de rayos X. Estos equipos pueden ser desplazados al lugar donde se encuentran las piezas a radiografiar, pero también pueden utilizarse en un recinto blindado que cuente con sistemas de seguridad.

Las principales características técnicas son el voltaje (la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo) y el amperaje (la corriente del tubo). En los equipos que se comercializan, el voltaje



Fuentes para gammagrafía industrial.



A la izquierda y en el centro, equipos de rayos X portátiles; a la derecha, acelerador para radiografía industrial.

máximo está en el rango de 100 a 360 kV y el amperaje máximo entre 2,5 y 10 mA. Hay equipos de rayos X que siempre se utilizan en búnker y pueden alcanzar un potencial de 600 kV.

Para que se emitan rayos X, es necesario que llegue energía al circuito de alta tensión para acelerar los electrones generados en el cátodo. Estos impactan en el objetivo, situado en el ánodo, emitiéndose rayos X a través de la ventana. Se puede integrar el sistema de alta tensión del equipo de rayos X en el circuito de seguridad y así controlar las condiciones en las que se generan dichos rayos.

En España hay dos instalaciones que tienen, cada una, un equipo acelerador de electrones para generar rayos X de uso en radiografía industrial. Estos equipos se utilizan en un recinto blindado, con sistemas de seguridad que aseguran las condiciones en las que se genera la radiación. Ambos son aceleradores lineales, uno de ellos de 6 MeV y el otro de 9 MeV.

Equipos de gammagrafía y elementos auxiliares

Los equipos más comunes para realizar radiografía industrial con fuentes gamma constan, básicamente, de un contenedor blindado donde se aloja un portafuentes que alberga la fuente radiactiva encapsulada.

De acuerdo con la norma ISO 3999, Radiation Protection- Apparatus for Industrial Gamma Radiography- Specifi-

cations for Performance, Design and Test, los contenedores se clasifican en categorías atendiendo a la localización de la fuente cuando el aparato está en la posición de trabajo.

Los equipos más usados se corresponden con la categoría II; en ellos la fuente radiactiva es proyectada de la posición blindada a la de radiografiado, fuera del contenedor, a través de una manguera de salida, mediante un elemento auxiliar, el telemando, que puede ser accionado de forma manual o automática.

El contenedor suele contar con unos dispositivos de seguridad para que la fuente no abandone su alojamiento blindado de forma no deseada.

Las fuentes que se utilizan son encapsuladas de forma especial, con una actividad en función del diseño del gammagrafo y del isótopo de que se trate. En España se utilizan fuentes de Ir-192, Se-75 y Co-60, siendo el Ir-192 el isótopo más ampliamente utilizado.

En España, los equipos más habituales que incorporan fuente de Ir-192 o de Se-75 son de la firma Oserix, modelo Exertus Dual 120, que puede albergar una fuente de Ir-192 de 4,4 TBq (120 Ci) o de Se-75 de 7,4 TBq (200 Ci), de actividad; o de la firma QSA Global, modelo Sentinel 880 serie Delta, que puede incorporar una fuente de Ir-192 o de Se-75 de 5,5 TBq (150 Ci) de actividad. Normalmente la carga de fuente no supera 3,7 TBq (100 Ci). Estos equipos disponen

de certificado como bulto B(U) para el transporte. En el caso del equipo Gammatamat SE-75 solo puede albergar una fuente de Se-75, que si se transporta como bulto tipo A la actividad máxima no superará 3,81 TBq (82 Ci).

Los equipos más habitualmente utilizados en España para albergar fuente de Co-60, son los de la marca QSA Global-Sentinel, modelo TO-680, que pueden incorporar una fuente de Co-60 de 4,07 TBq (110 Ci) de actividad, aunque normalmente no supera 3,7 TBq (100 Ci).

Otra clasificación de los contenedores, según la norma ISO 3999, atiende a su movilidad. Según este criterio establecen tres grupos: clase P (portátiles); clase M (móviles) y clase F (fijos). Los equipos de Ir-192 y de Se-75 son clase P.

Un elemento que interesa destacar por su posible integración en el circuito de seguridad es el telemando, que es un elemento auxiliar que permite, a distancia, posicionar la fuente en el punto de trabajo. Se trata de un cable flexible recubierto por una manguera, en uno de cuyos extremos dispone de un mecanismo para accionarlo, bien manualmente (manivela) o bien de forma automática. En el otro extremo lleva el mecanismo conector (conector macho) para unirlo con el portafuentes (conector hembra) y acoplarlo al contenedor gammagrafíco. Los telemandos automáticos incorporan dispositivos programables para fijar el tiempo de exposición. Además, permite implementar en el sistema de seguridad del recinto de



Oserix Exertus Dual 120.



Gamamat SE-75.



Telemando manual.

operación elementos que actúen para retraer la fuente en ciertas situaciones, al contrario que el telemando manual.

Lecciones aprendidas de los incidentes acaecidos en España

Aunque las operaciones de radiografía y gammagrafía industrial realizadas *in situ* suponen mayor riesgo radiológico frente a las fijas, especialmente en el caso de la gammagrafía, por las dificultades añadidas de control de fuentes de alta actividad, es el modo de operación más extendido en España. Considerando las instalaciones que tienen autorizada la actividad de gammagrafía industrial, únicamente el 16 % realiza gammagrafía fija frente al 56 % que únicamente realiza esta actividad *in situ*. El otro 28 % son instalaciones que tienen autorizada esta actividad según los dos modos de operación. No se realizó un estudio tan detallado en el caso de radiografía industrial con rayos X, por su menor impacto, desde el punto de vista de la protección radiológica.

Del análisis de las situaciones que han provocado incidentes en las operaciones de radiografía en España, y especialmente de gammagrafía industrial, desde el año 1998 hasta 2021, se observa que, aproximadamente el 74 % se produjo por trabajos realizados *in situ* y el 26 % en los realizados en recintos blindados, bien en búnkeres diseñados específicamente para ello y que disponen de sistemas de seguridad, o en lugares blindados acondicionados (campa), pero

que no disponen de sistemas de seguridad. Solo se han reportado incidentes con superación del límite de dosis en operaciones realizadas en un búnker que disponía de enclavamientos de seguridad cuando este sistema ha fallado. Entre los sucesos iniciadores de estos incidentes *in situ* están los que involucran la falta de seguimiento de procedimientos adecuados (60 %), que tiene mucha influencia en gammagrafía *in situ*.

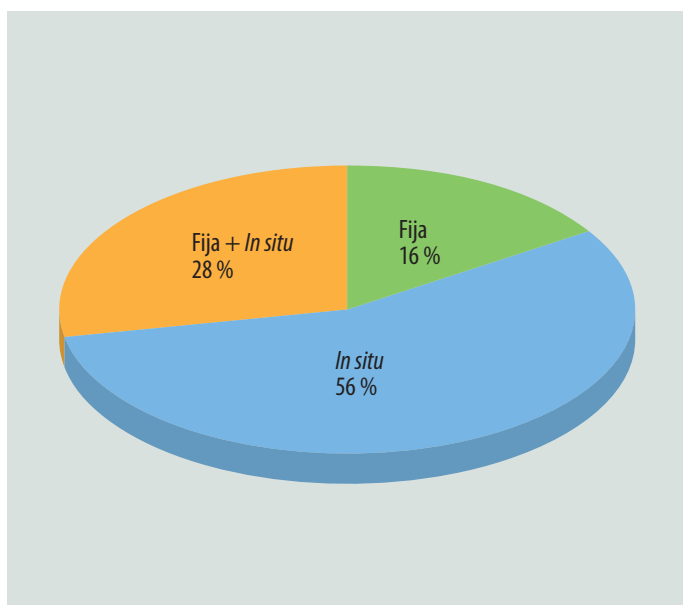
Tomando como referencia las lecciones aprendidas de los incidentes acaecidos en España, donde el fallo debido al factor humano puede ocasionar situaciones que supongan dosis que superen los límites de para operadores o miembros del público, se hace necesario plantear las condiciones que justifiquen la realización de las operaciones *in situ*. Además, del análisis de los incidentes acaecidos tras el fallo del sistema de seguridad en operaciones de radiografía y gammagrafía industrial con telemando manual, y a los ocurridos en recintos blindados durante operaciones de gammagrafía que utilizaban como elemento auxiliar un telemando automático no contemplado en el diseño, se ha procedido, a través del Foro de la Industria, a reevaluar los sistemas de seguridad de los recintos blindados teniendo en cuenta recomendaciones internacionales y la normativa que aplican los países de nuestro entorno, que se materializó en la citada Instrucción Técnica Complementaria.

Recintos de operación. Sistemas de seguridad

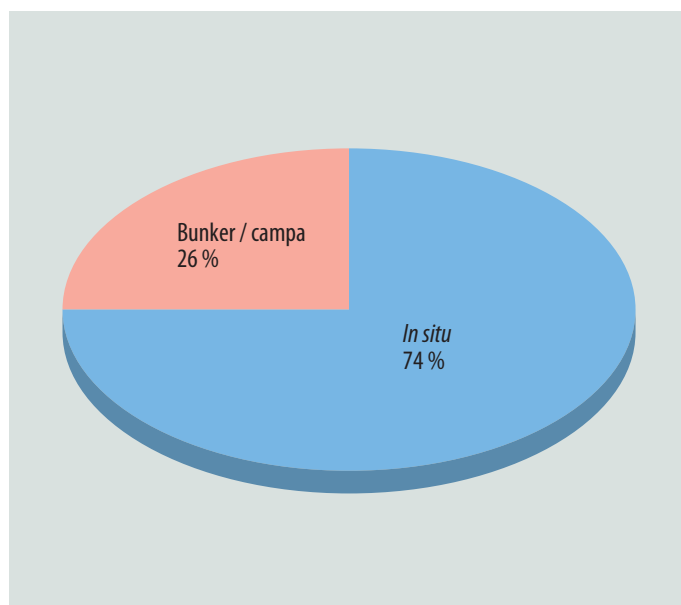
Se define búnker de radiografía y gammagrafía industrial como un recinto cerrado, al menos perimetralmente, que dispone de blindaje suficiente y de un sistema de seguridad adecuado, y que se utiliza para realizar radiografías o gammagrafías en su interior. Las operaciones realizadas en este tipo de recintos tendrán la consideración de radiografía fija. La mayoría de los búnkeres autorizados en España están diseñados para trabajar indistintamente con equipos de rayos X o con gammágrafos con telemando manual. Todas las operaciones con gammágrafos que incorporan fuente de Co-60 se realizan de forma fija.

Estos recintos disponen de blindaje, de forma que la tasa de dosis en el exterior, en zonas fuera del control del titular, sea inferior a 1 mSv/año. La Instrucción Técnica Complementaria sobre estos recintos no introduce ninguna modificación respecto a este criterio.

El sistema de seguridad de los búnkeres tiene como objetivo evitar la irradiación del personal debido a los trabajos de radiografía o gammagrafía que se realizan en el interior del recinto, y comprende: enclavamientos, señalizaciones, alarmas, pulsadores de emergencia, medidores de radiación asociados al sistema y controladores lógicos programables computarizados (PLC) para implementar funciones lógicas relacionadas con la seguridad.



Modo de operación.



Incidentes 1998-2021.

Como punto de partida se procedió al análisis de cada uno de los criterios que se han venido aplicando para la autorización de los búnkeres de radiografía y gammagrafía fija, recogidos en el procedimiento del CSN sobre Evaluación de Instalaciones de Radiografía y Gammagrafía Industrial, con el objetivo de detectar carencias o posibilidades de mejora.

Diseño del sistema de seguridad de los búnkeres de operación en España

El sistema de seguridad de un búnker de operación debe contemplar:

- Enclavamientos de seguridad que garanticen que las puertas y/o accesos no puedan ser abiertos durante la exposición, aunque al menos una puerta si podrá ser abierta desde el interior. La exposición no podrá ser reiniciada simplemente por el cierre de la puerta, sino que deberá efectuarse desde la unidad de control, situada en una posición exterior al búnker, desde la que se vea fácilmente la puerta de acceso. Para actuación en caso de emergencia se habilita la posibilidad de desbloqueo de la puerta bajo un sistema controlado (por

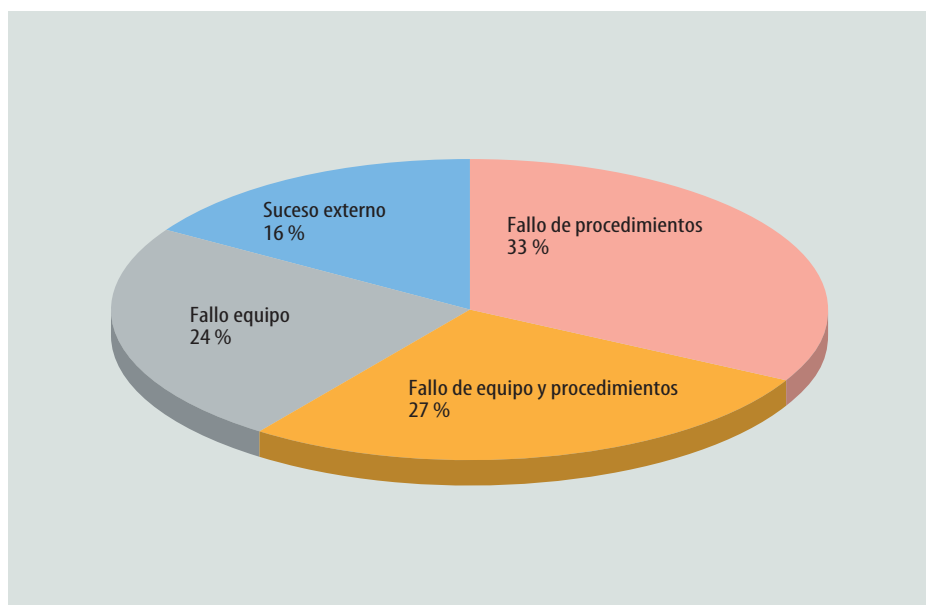
ejemplo, llave en posesión de un responsable designado al efecto).

- Señalización luminosa que incluya una señal roja de advertencia, en el exterior de la puerta de acceso, que permanecerá encendida durante la exposición. Junto a la señal deberá existir un cartel que explique su significado. El sistema de enclavamiento de los accesos y la luz de advertencia deberán ser independientes, de manera que el fallo de uno no implique el fallo del otro.
- Un detector de radiación fijo, situado en el interior de cada búnker, conectado al sistema de seguridad para efectuar el enclavamiento de los accesos y el funcionamiento de las luces de advertencia.
- En el caso de búnkeres de gran tamaño se podría requerir una señal sonora que avise de que se va a producir la exposición, así como la instalación de pulsadores para efectuar una ronda de seguridad o incluso la instalación de cámaras de TV.

Estos requisitos pueden sustituirse por otro sistema que proporcione una seguridad equivalente.

Del análisis de los sistemas de seguridad de los búnkeres autorizados en España se puso de manifiesto que:

- a) La mayoría de los recintos solo contaban con un monitor de radiación conectado al sistema de seguridad. Así, el fallo del monitor de radiación suponía el fallo del enclavamiento y de la señalización.
- b) No se enclavan los accesos con la fuente expuesta o emisión de rayos X si la radiación que llega al único monitor con el que se realiza el enclavamiento no supera el nivel de tarado establecido.
- c) No se ha tenido en cuenta en su evaluación la posibilidad de utilizar gammágrafos con telemando automático. Ha habido algún caso que, utilizando un telemando de este tipo, el diseño del sistema de seguridad implicaba que la apertura de la puerta provocaba el corte de alimentación eléctrica al motor del telemando. Esto supone que un fallo del único elemento con el que se efectúa el enclavamiento de puerta, el monitor, provoca el fallo del enclavamiento, y permite el acceso al interior del búnker con fuente expuesta. La apertura de puerta provoca



Sucesos iniciadores en incidentes *in situ*.

el corte de alimentación eléctrica al motor del telemando e impide la retracción automática de la fuente al interior del gammágrafo, quedando en exposición.

Por ello, se estimó necesario valorar si era necesaria la implementación de mejoras en el sistema de seguridad de los recintos autorizados, considerando que estas mejoras pasarían a formar parte de los requisitos para futuras autorizaciones. El objetivo fue establecer:

- Requisitos mínimos que deben cumplir
- Elementos que deben incorporar y sus características
- Registros y documentación que se deben presentar para su autorización
- Plan de Verificación y mantenimiento

Requisitos exigidos en otros países en el diseño de los búnkeres de operación

Como primer paso se efectuó un análisis de la normativa internacional y de países de nuestro entorno, en concreto Francia,

Estados Unidos y Reino Unido, aplicable a estos recintos.

Respecto a las normas internacionales se ha considerado la Guía de Seguridad SSG-11 del OIEA, sobre Seguridad radiológica en la radiografía industrial, que incluye un apartado con los sistemas de seguridad y sistemas de alerta inherentes a la gammagrafía en recinto blindado. Entre los criterios se incluyen que en el interior del bunker se contará con un monitor provisto de elementos de seguridad intrínsecos que, según la Guía de Seguridad SSG-8 del OIEA, sobre Seguridad radiológica de las instalaciones de irradiación de rayos gamma, electrones y rayos X, implica que haya sido concebido a prueba de fallos, de manera que un fallo o avería del detector produzca el mismo resultado que una lectura que arroje cifras de radiación elevadas.

De los tres países elegidos únicamente Francia tiene reglamentación específica para recintos donde se realicen trabajos de gammagrafía industrial fija y para radiografía industrial con rayos X, que incluye requisitos para los sistemas de seguridad en búnkeres de operación para radiografía industrial y para gam-

magrafía, diferenciando si se trabaja con telemando manual o automático. Especifican los requisitos en cuanto a los enclavamientos, alarmas y señalizaciones que incorporan estos sistemas de seguridad, considerando que deben cumplir criterios de redundancia y diversidad. Por ello, los enclavamientos se realizan con la baliza detectora de radiación, que debe contar con una autocomprobación de su funcionamiento, pero también con la señal eléctrica del equipo a utilizar, ya sea de rayos X o gammágrafo y con telemando manual o automático.

En Estados Unidos, los requisitos para las instalaciones donde se efectúa radiografiado industrial, tanto con rayos X como con fuentes gamma con energías hasta 10 MeV, se recogen en la norma ANSI/HPS N43.3-2008 American National Standard For General Radiation Safety – Installations Using Non-Medical X-Ray and Sealed Gamma – Ray Sources, Energies Up to 10 MeV.

Esta norma no aporta ningún criterio adicional a los ya considerados, pero incluye aspectos relativos a controladores lógicos programables computarizados (PLC) para implementar funciones lógicas simples relacionadas con la seguridad, aplicables a los sistemas de seguridad de los recintos y al análisis de los modos de fallo de los relés que incorporan los enclavamientos, considerando que estos fallos deben llevar a la instalación a un estado seguro. También incluye aspectos relacionados con la validación y verificación de software y firmware utilizado en los circuitos de seguridad, con objeto de verificar que la salida del desarrollo de software cumple con sus requisitos de entrada.

Reino Unido no dispone de una normativa específica respecto a estas instalaciones, pero se ha analizado la normativa que cumplen algunos sistemas de seguridad para cabinas de rayos X y gamma comerciales, como el sistema

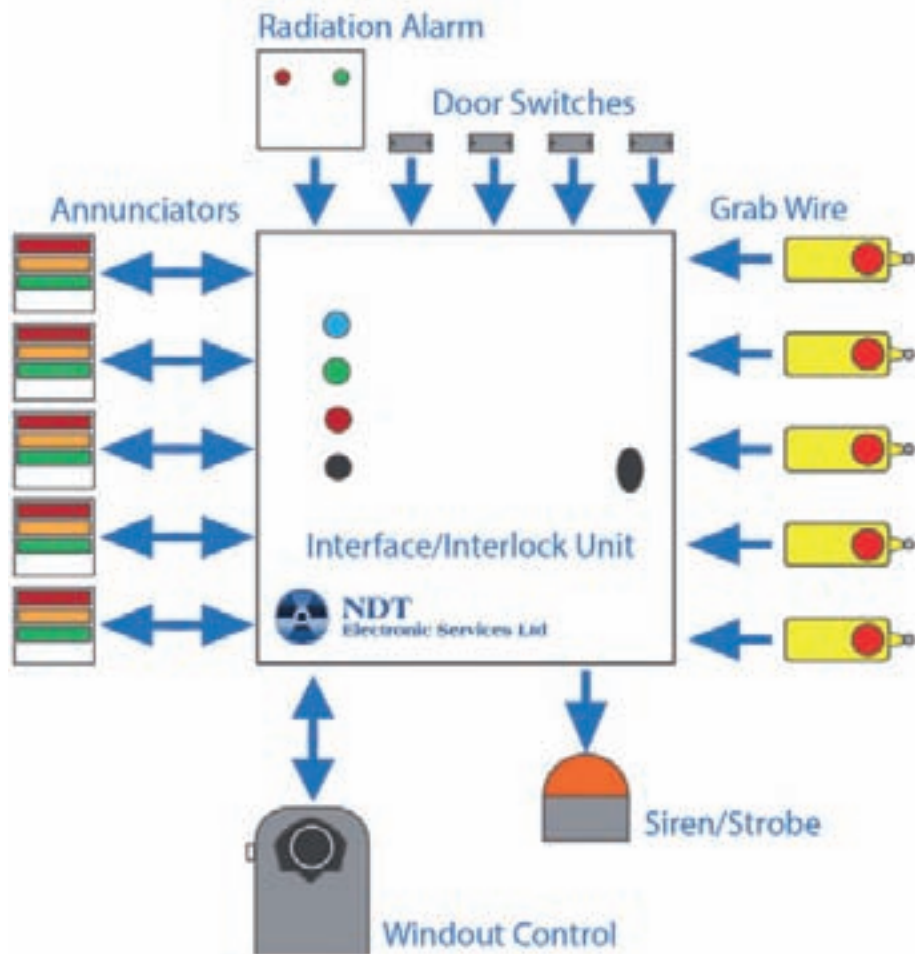
denominado ISIS, diseñado y fabricado por NDT Electronic Services, para deducir los requisitos que le aplican y extrapolar las implicaciones en relación con la seguridad.

El sistema ISIS cumple con el Reglamento de Radiación Ionizante de UK y los estándares de la industria sobre requisitos de seguridad en máquinas, recogidos en las normas ISO 13849 Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad, y EN62061:2005 Seguridad de las máquinas. Seguridad funcional de sistemas de mando eléctricos, electrónicos y electrónicos programables relativos a la seguridad. La aptitud del sistema de mando que desempeña una función de seguridad, se indica mediante un nivel de integridad de seguridad, estando normalizada la relación entre estos dos conceptos: nivel de rendimiento y nivel de integridad (PL y SIL). También requieren un análisis de los elementos que forman parte del circuito de seguridad, que pueden estar constituidos de soporte material (hardware) y soporte lógico (software) incluyendo las verificaciones a efectuar y los registros que conlleva.

Plan de Mejora de los sistemas de seguridad de los búnkeres de operación en España

En la Instrucción Técnica Complementaria se recogen los criterios para efectuar estas operaciones, así como los requisitos del sistema de seguridad de los recintos de operación, que en resumen comprenden:

- Priorizar las operaciones en búnker por la mayor garantía de seguridad que supone a los operadores, a los trabajadores del cliente y al público. Solo está justificada la gammagrafía *in situ* cuando no sea factible realizarla de forma fija por su dificultad técnica o porque constituya una actuación puntual.



Sistema de seguridad ISIS.

- Se define como telemando automático todo aquel que no es exclusivamente de tracción manual.
- El sistema de seguridad de los búnkeres diseñados para realizar radiografía industrial con equipos generadores de rayos X o con gammágrafos que utilizan como elemento auxiliar un telemando automático, deberán cumplir criterios de redundancia y diversidad, de forma que se impida la emisión de rayos X o la proyección de la fuente si los accesos no están cerrados. El bloqueo de los accesos se mantendrá por la señal de superación de tasa de dosis fijada en el monitor de radiación. Abrir cualquier acceso o pulsar dispositivos de parada de emergencia provocará el cese de la emisión de rayos X o el re-

torno automático de la fuente a la posición de seguridad, según aplique.

- El sistema de seguridad de búnkeres diseñados para utilizar gammágrafos con telemando manual contará con dos o más monitores de radiación, ubicados en diferentes posiciones en el interior del búnker, de manera que al alcanzar el valor de tasa de dosis fijado en cualquiera de ellos provoque el enclavamiento de los accesos al búnker. Al menos uno de estos monitores debe haber sido concebido a prueba de fallos.
- Se dispondrá una señal luminosa roja de advertencia integrada en el sistema de seguridad, situada en el exterior de la puerta de acceso al búnker, que permanecerá encendida

cuando haya generación de rayos X o exposición de la fuente. El diseño del enclavamiento del sistema de seguridad garantizará que el fallo de la luz roja de advertencia no supondrá el fallo del sistema de seguridad.

- Se define el “búnker de gran tamaño” y se incluyen elementos adicionales en el sistema de seguridad: señalización sonora, pulsadores para efectuar una ronda o cámaras de TV
- Documentación adicional para el licenciamiento de estos recintos:
 - Diagrama que recoja la estructura lógica de seguridad (bloque de entrada, tratamiento y bloque de salida) para cada una de las posibilidades de funcionamiento del búnker: gammagrafía con telemando manual y/o automático o rayos X
 - Programa de verificación periódico y mantenimiento del sistema de seguridad
 - Informe sobre las pruebas de validación del sistema de seguridad previo a la puesta en marcha del recinto.

La implantación de estas medidas va encaminada a reducir la dosis que reciben los trabajadores de este sector, tanto en operación normal como en caso de incidente, debido fundamentalmente a la disminución de trabajos de forma móvil. Además, la mejora del diseño de los sistemas de seguridad de los recintos de operación será una herramienta eficaz para reducir el número de incidentes con consecuencias radiológicas.

Para el CSN, la implantación de esta instrucción supone la reevaluación de todos los recintos ya autorizados y además se espera un incremento significativo de solicitudes para incorporar nuevos búnkeres, así como un incremento del

número de inspecciones asociadas a estas prácticas. 

Referencias

- Guía de Seguridad nº 5.14 del CSN Seguridad y Protección Radiológica en las Instalaciones Radiactivas de gammagrafía industrial” rev.1. 2015.
- Plan de Actuación para las instalaciones de Gammagrafía, de referencia CSN/SRO/IRIN/PlanGam/01, aprobado por el CSN en el año 2001.
- Instrucción Técnica Complementaria del CSN de referencia CSN/SRO/IRIN/IRA-0000/ITC-GAM/01/05, titulada Informe sobre una actuación propuesta para la mejora de las instalaciones de gammagrafía móvil.
- ISO 2919:2012 Radiological protection- Sealed radioactive sources- General requirements and classification
- Informe de evaluación de los sistemas de seguridad de los búnkeres de operación con equipos de gammagrafía y radiografía industrial, de referencia CSN/TGE/IRIN/21/2880
- Instrucción Técnica Complementaria del CSN de referencia CSN/SRO/IRIN/IRA-0000/ITC-búnker operación-01/2021, titulada Instrucción Técnica Complementaria a la autorización de la instalación radiactiva de radiografía y gammagrafía industrial
- Internacional Standard ISO 3999 Radiation Protection- Apparatus for industrial gamma radiography- Specification for performance, design and test”. 2004.
- Safety Series nº 13 Radiation Protection and Safety in industrial radiography. IAEA 1999.
- Safety Series nº 7 Lessons learned from accidents in industrial radiography. IAEA 1998.
- Guía de seguridad nº SSG-11 Seguridad radiológica en la radiografía industria IAEA 2013
- Guía de seguridad nº SSG-8 Seguridad radiológica de las instalaciones de irradiación de rayos gamma, electrones y rayos X IAEA 2015.

- ANSI/HPS N43.3-2008 American National Standard For General Radiation Safety –Installations Using Non-Medical X-Ray and Sealed Gamma – Ray Sources, Energies Up to 10 MeV.
- The Ionising Radiations Regulations 2017 (UK)
- Norma francesa NF C 15-160 Installations pour la production et l'utilisation de rayonnements X- Exigences de radioprotection, 2011
- Norma francesa NF M 62-105 Accélérateurs industriels: Installations 1998
- Norma francesa NF M62-102 Radioprotection-Installations de radiologie gamma. 2015
- EN 62061 Safety of machinery- Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems (IEC 62061: 2005/A1:2012/A2:2015)
- UNE-EN ISO 13849-1: Seguridad de máquinas. Partes de los sistemas de mando relativa a la seguridad. Parte 1: Principios generales para el diseño (ISO 13849-1:2015) .2016
- UNE-EN ISO 13849-2: Seguridad de máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 2: Validación (ISO 13849-2:2012). 2013
- UNE-EN ISO 12100: Seguridad de máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo (ISO 12100:2010). 2012

Páginas WEB

- Características equipos Exertus: <https://www.oserix.com/proyectors>.
- Características equipos de QSA Global: <https://www.qsa-global.com>.
- Características equipos Gammamat SE-75: <https://www.bestndt.net>.
- Equipos de radiografía Teledyne ICM: www.teledyneicm.com
- Equipos de radiografía Yxlon: <https://www.yxlon.com>
- Características sistema de seguridad ISIS: <https://www.ndtelectronicservices.com>
- Archivos de documentación del CSN: <https://www.csn.es/proteccion-radiologica/foros/area-industrial>



El célebre plano de la *military room* de *Teléfono rojo ¿volamos hacia Moscú?*

La visión del cine y la televisión sobre la energía nuclear desde mediados del siglo XX

Monstruos, apocalipsis y licencias poéticas

El mundo audiovisual de ficción se ha sentido atraído, principalmente, por el lado más destructivo de la energía nuclear. Así, en las películas de James Bond el malo siempre parece tener a su disposición armamento nuclear para poder destruir el mundo, y los accidentes nucleares nos han dado algunos de los monstruos más icónicos de la historia del cine,

caso de Godzilla, aunque también a varios superhéroes, véase Hulk (o La Masa, como era conocido en España en sus orígenes). Desde la crisis de los misiles de Cuba, a principios de los sesenta, siempre que alguien se ha imaginado un futuro apocalíptico, este ha llegado tras una guerra nuclear.

■ Texto: **Sergio Ariza** | periodista ■

Los escritores de ficción siempre han tendido a capitalizar la ignorancia generalizada sobre las radiaciones para poder utilizarla como la base para poder crear todo tipo de criaturas espeluznantes y de sucesos catastróficos, sobre todo después de que las bombas de Hiroshima y Nagasaki enseñaran al mundo el terrible poder de destrucción de la

energía nuclear. Tiene cierta justicia poética que fuera en Japón, el país castigado con las dos bombas, donde surgiera el primer monstruo radiactivo de la historia, Godzilla. Un lagarto que debido a la radiación de una bomba nuclear crece y aterroriza al país mediante sus superpoderes. Su mero aliento atómico es capaz de destruir todo lo que toca.

El mismo año de su estreno, 1954, en EE. UU. se realizó *La humanidad en peligro* (*Them!*), en la que el ejército norteamericano realiza unas pruebas atómicas en un desierto de los Estados Unidos y, como resultado de las radiaciones, unas hormigas sufrían una mutación que las hacía crecer hasta alcanzar gigantescas dimensiones, con los insectos mutantes

dirigiéndose hacia las ciudades más cercanas para destruirlas. Este tipo de monstruos radiactivos se multiplicaría durante aquella década. Apenas un año después aparecería el pulpo gigante de *Surgió del fondo del mar*; en 1957 se sufrió *El ataque de los cangrejos gigantes*, con dos crustáceos que no solo crecían de manera gigantesca debido a la radiación, sino que, además, eran capaces de asimilar la inteligencia de los seres humanos. También ese año, en *Beginning of the End*, varios saltamontes gigantes intentan destruir Chicago tras comer unos vegetales radiactivos. En cambio, en *El increíble hombre menguante* pasaba al revés, un hombre comenzaba a hacerse increíblemente pequeño después de verse afectado por una nube tóxica.

Y así se puede forjar una idea de lo que ocurría en decenas de películas de ciencia-ficción, en las que los guionistas trataban de visualizar el miedo que sentía la población a un posible ataque nuclear y a sus consecuencias, sobre todo la temida e invisible radiación. Eso sí, a principios de los 60 varios artistas de cómic como Stan Lee o Jack Kirby utilizaron la exposición a la radiación para dar poderes a muchos de sus superhéroes; Bruce Banner se convirtió en Hulk debido a la exposición accidental a los rayos gamma durante la detonación de una bomba experimental y Peter Parker lograba subirse por el techo como Spiderman después de ser mordido por una araña radiactiva. También los 4 Fantásticos encuentran sus poderes tras recibir una exposición de rayos cósmicos. Todos tendrían, con el paso de los años, sus propias adaptaciones cinematográficas.

El apocalipsis se acerca... Y será nuclear

Eso sí, en la década de los 60, tras la crisis de los misiles cubanos de 1962, en la que la Unión Soviética y EE. UU. estuvieron a punto de reventar al mundo con bom-

bas nucleares, los guionistas comenzaron a imaginarse qué podría pasar si se llegaba a ese punto. El más mordaz, certero y caustico fue Stanley Kubrick, que en modo comedia negrísima imaginaba en *Teléfono rojo, ¿volamos hacia Moscú?* a un militar estadounidense que, convencido de que los soviéticos estaban contaminando el agua, lanzaba un ataque nuclear contra Rusia que acabará con el apocalipsis nuclear en medio de la suave voz de Vera Lynn. El director daba rienda suelta a un genio de la comedia como Peter Sellers, que entregó la actuación de su vida interpretando tres papeles distintos, un militar inglés, el presidente de los EE. UU. y el mítico Doctor Strange-love del título original, un personaje tan siniestro y, a la vez, divertido que Kubrick no encontró una sola toma válida en la que alguno de los otros actores no se estuviera riendo. Pero lo interesante de la cinta es que lo que cuenta no tiene ni pizca de gracia, el mundo se podría haber acabado así, sin demasiados problemas. Estrenada al poco de la crisis de los misiles de Cuba, Kubrick nos viene a decir que

la estupidez humana nos llevará a nuestra autodestrucción y, cuando esto pase, muchos lo harán encantados, cabalgando a lomos del arma que inicie la mecha.

Ese mismo 1964 Sydney Lumet estrenaba *Punto Limite*, con Henry Fonda y Walter Matthau en el reparto, que puede verse como una especie de reverso de *Teléfono rojo*, aunque esta vez, en otro de los finales más brutales de la historia del cine, en vez de desencadenarse el holocausto nuclear tras el bombardeo nuclear de Moscú, el presidente de los EE. UU. accederá a destruir Nueva York, a cambio de conseguir la paz, a pesar de que la Primera Dama y toda la familia del piloto encargado de tirar la bomba están allí.

Otra película fascinante en la que se juega con ese apocalipsis nuclear y lo que viene después es la hermosa *El muelle* (*La Jetée*) de Chris Marker, una de las experiencias cinematográficas más fascinantes de la historia, un medimetroraje de 28 minutos, sobre imágenes fijas y voces en *off*, sobre viajes en el tiempo, al que su director bautizó como fotonovela y que sirvió de inspiración para el 12



El monstruoso lagarto de *Godzilla*, producto de su exposición a la radiación.

Monos de Terry Gilliam. La película comienza con el recuerdo de una imagen que no ha podido olvidar el protagonista, mientras estaba con sus padres en el Aeropuerto de Orly vio como asesinaban a alguien. Luego la película nos transporta a un futuro en el que, tras la Tercera Guerra Mundial, la humanidad se enfrenta a su extinción. Mejor no saber mucho más del argumento y sumergirse en esta fascinante obra en la que se cuenta, además, una rocambolesca historia de amor y recuerdos.

También están *Akira*, y su Neo-Tokio, construido sobre las ruinas de la antigua capital japonesa destruida tras la Tercera Guerra Mundial; *Cuando el viento sopla*, con una pareja de ancianos británicos reaccionando a un ataque nuclear de la URSS; las diversas películas de *Mad Max*, aunque solo en *La Cúpula del Trueno* se especifica que ha habido una guerra nuclear; dos de *Los sueños* de Akira Kurosawa tratan sobre el holocausto nuclear, incluido uno en el que los millonarios y los miembros del Gobierno han sufrido una mutación en la que les sale un cuerno que les causa un dolor inaudito; o la más impactante de todas, la icónica *El planeta de los simios* y su inolvidable final con



Hulk, o La Masa, el superhéroe que adquiere sus poderes tras ser sometido a intensa radiación gamma.

Charlton Heston gritando "¡Maníacos! ¡Lo habéis destruido! ¡Os maldigo a todos!" ante los restos de la Estatua de la Libertad.

Como no podía ser de otra forma son también los años en los que todos

los villanos del mundo parecen tener una obsesión por las armas nucleares, desde el conocido Dr. No de las películas de James Bond hasta el propio Goldfinger, pasando por ese maletín que es mejor no abrir en *El beso mortal*.



La célebre escena final de *El planeta de los simios*.



Mel Gibson en la película original de la serie *Mad Max*.

Realismo a partir de *Three Mile Island*

Una película mucho más realista iba a influir en la opinión pública más que todos los monstruos, villanos y apocalipsis anteriores. Se trataba de *El síndrome de China* y trataba sobre una casi fusión nuclear en una central eléctrica, que amenazaba con hacer inhabitables enormes trozos de tierra. Se estrenó en 1979 con Michael Douglas, Jane Fonda y Jack Lemmon, y

estos dos últimos fueron nominados al Oscar gracias a la enorme repercusión que tuvo la película. Y es que trece días después de su estreno la realidad casi copió a la ficción con el accidente de la central nuclear de Three Mile Island, en el que el combustible nuclear se sobrecalentó y parte del núcleo se fundió.

Pero, sin duda, el mayor varapalo que se llevó la energía nuclear fue cuando en Chernóbil, Ucrania, se produjo el peor desastre nuclear de la historia, en abril

de 1986. Este accidente también sería llevado con mucho éxito a la pantalla en la miniserie de HBO *Chernóbil*, estrenada en 2019, una maravilla creada por Craig Mazin, basánda en el libro *Voces de Chernóbil* de Svetlana Alexiévich, en la que se hace una representación minuciosa, desde múltiples puntos de vista, de lo acontecido tras el accidente de esa central nuclear. Una poderosa y angustiosa recreación de algo muy grave que pudo ser mucho peor. La serie es una maravilla en todos sus aspectos, tanto técnicos como artísticos, pero encuentra su corazón en la relación de dos de sus personajes, el brillante Valery Legasov, interpretado por Jared Harris, y el tecnócrata Boris Shcherbina, recreado por Stellan Skarsgård. Su grado de precisión histórica es increíble, pero lo que la eleva de la simple recreación es el haber proporcionado alma a sus personajes.

También habría que nombrar en esta categoría a la película de animación de Isao Takahata *La tumba de las luciérnagas*, con la icónica imagen en la que Seita transporta a su hermana Setsuku a la espalda, que está ambientada en los bombardeos de Kobe y basada en una imagen real de un niño que llevaba a su hermano



Jane Fonda y Jack Lemmon en *El síndrome de China*.



Arriba, fotograma de *Stalker*, de Andrei Tarkovsky. Abajo, imagen de *Soy Cuba*, de Mikhail Kalatozov.



muerto a un crematorio después del bombardeo de Hiroshima.

La poética de *Stalker* y *Soy Cuba*

Alejadas de ese realismo y de los elementos *pulp* de los monstruos de los 50 y los apocalipsis posteriores se encuentran dos películas únicas y fascinantes, *Soy Cuba* y *Stalker*, dirigidas por sendos directores soviéticos, Mikhail Kalatozov y Andrei Tarkovsky. No pueden ser más distintas entre sí, pero las une su increíble calidad cinematográfica y su relación con las catástrofes nucleares. La primera no trata específicamente sobre eso, pero se comenzó a rodar una semana después de que los misiles soviéticos abandonasen Cuba dando por terminado el momento en el que el mundo estuvo más cerca de una guerra nuclear.

Nunca hubo un cambio más poético que este, misiles por cámaras, destrucción por arte, y es que lo que Kalatozov y su equipo de cubanos y soviéticos consiguieron fue una verdadera maravilla visual, una de las películas con algunos de

los planos más asombrosos desde la aparición de *Ciudadano Kane*. El caso es que la película estaba hecha con un propósito de propaganda, para atacar el impacto y la decadencia que Occidente, principalmente EE.UU., había mostrado en la Cuba de Batista. Se desarrollaba en cuatro episodios que iban desde las vivencias de una prostituta en los nightclubs llenos de ricachones yanquis hasta unos granjeros que ayudan a los guerrilleros en Sierra Maestra, pero la película se elevaba por encima de su argumento con un trabajo de

cámara asombroso, una increíble poesía visual en la que se transmite más con mareantes movimientos de cámara y efectos sonoros que lo que las palabras pueden expresar.

Lo curioso del caso es que la película fue un fracaso en su tiempo, vista con sospecha tanto desde Moscú como desde La Habana, pero fue recuperada poste-

Se trata de una película reflexiva y lenta, pero también mágica e hipnótica. Tarkovsky narra el viaje de tres hombres (el Stalker del título, una especie de guía hacia el lugar prohibido en el que ha habido un accidente nuclear; un escritor, representando la ficción, y un profesor, representando a la razón) a la Zona, un lugar que, según dicen, alberga un lugar lla-



El actor Peter Sellers en *Teléfono rojo, ¿volumos hacia Moscú?*

riormente cuando, en los 90, gente como Martin Scorsese o Francis Ford Coppola comenzaron a cantar sus alabanzas. Algo normal para una película que incluye un increíble plano secuencia que comienza en la azotea de un edificio donde toca una banda de rock & roll y hay un concurso de belleza, la cámara sigue todo y baja dos pisos hasta las hamacas del hotel, donde los gordos capitalistas se mezclan con las bellezas locales, y acaba metiéndose en el agua siguiendo a una de estas últimas, donde cambia el sonido de la banda sonora, todo ello sin cortar en ningún momento el plano.

Pero quizás la película más poética que se ha filmado nunca en relación con un accidente nuclear sea *Stalker*, del aclamado director ruso Andrei Tarkovsky.

mado la Habitación, donde los sueños se hacen realidad. Tarkovsky coge la realidad y la deforma a su favor, en una Unión Soviética en la que desde los 50 existían lugares cerrados, con pueblos enteros abandonados, donde se realizaban oscuras pruebas atómicas. En cierto modo, *Stalker* se adelantó a la tragedia de Chernóbil. No en vano, años después, a los merodeadores que se colaban en la amplia zona de exclusión que quedó tras el desastre en Ucrania se les conocería como stalkers.

No es de extrañar la enorme fascinación que provoca esta película, sus planos son largos y evocadores, avanzando poco a poco, pero, desde luego, no es para todos los paladares. Antes de entrar en la Zona hay una larga escena en la

que se ve a los tres protagonistas en las vías sin que pase mucho más, está hecho para provocar una especie de trance, de preludio a la entrada al sueño que es la Zona; hay un corte abrupto y de repente ya estamos allí en ese mundo de magia y sueños. El sepia del principio es sustituido por el color (como ocurría en *El Mago de Oz*), nuevamente la dualidad entre realidad y fantasía. La radiación vuelve a ser algo mágico, pero también terrorífico y allí, dentro de la Zona, la película alcanzará su maravillosa conclusión, con los que sean capaces de llegar al final del viaje siendo recompensados con una excelente escena final.

Epílogo

Pero ahora que parece que estamos al borde de una nueva guerra fría, quiero acabar este artículo con el que considero uno de los mejores finales de la historia del cine, uno en el que se refleja toda la estupidez humana; se trata del de *Teléfono rojo, ¿volumos hacia Moscú?* Con el mundo al borde de la destrucción, vemos a los grandes hombres de las mayores potencias haciendo planes, intentando sacar ventajas del apocalipsis para su lado; nadie piensa en lo que es mejor para todos, solo para sí mismos, entonces el científico nazi, supuestamente reformado, que trabaja para los estadounidenses (alguien que ya ha propuesto meter a los más poderosos en búnkeres anti radiación con varias mujeres por barba para poder repoblar la Tierra) se levanta de su silla de ruedas y comienza a decir “señor, tengo un plan...”, pero en ese momento se da cuenta del milagro y exclama “¡Mein Führer, puedo caminar!”. Entonces Stanley Kubrick corta a lo bruto y mete un montaje con todas las explosiones atómicas posibles y sus icónicos hongos, mientras Vera Lynn canta “We’ll Meet Again” Es el agri dulce fin de la humanidad. Esperemos que siga sirviendo de aviso... ©



Ellen Gleditsch, pionera en la investigación sobre la radiactividad

La carrera científica nunca ha sido un camino de rosas. La imagen bucólica del investigador del siglo XIX, absorto en sus pensamientos, con los ojos clavados en su microscopio o manejando extraños artilugios, esconde las intrigas y malas artes de compañeros, jefes o competidores, especialmente en el caso de las mujeres. Una de las que a principios del siglo XX tuvieron que lidiar

con ese desdén paternalista que las relegaba y deslucía sus aportaciones fue Ellen Gleditsch, una química noruega que realizó importantes estudios en el entonces efervescente mundo de la radiactividad. Vista con cierta condescendencia entonces e ignorada después durante décadas, incluso en su propio país, ahora reivindicada.

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

La historia cuenta con infinidad de anécdotas sobre el descrédito que han sufrido ciertas figuras del conocimiento o las batallas que otros han librado por apoderarse de méritos ajenos o derribarlos. Para la posteridad ha quedado el famoso manifiesto Cien autores en contra de Einstein, contestado brillantemente con una sola frase: “¿Por qué cien? Si estuviese equivocado con uno solo bastaría”. De Rosalind Franklin, autora de la primera imagen del ADN, no se supo, hasta después de su muerte, que tras el descubrimiento de la doble hélice no estaban solo Watson y Crick, aunque cuando llegó el Nobel ya era tarde para ella.

Las primeras mujeres científicas tuvieron muy difícil el reconocimiento. En primer lugar, porque no se les permitía estudiar; después, porque si lo lograban, lo hacían de manera clandestina, usando un seudónimo masculino o trabajando a la sombra de sus colegas, maridos o jefes. El llamado efecto Matilda denuncia cómo se ha ocultado la contribución de las mujeres a la ciencia y la apropiación del mérito femenino por muchos investigadores varones.

Pero ¿qué ocurre cuando detrás de una gran mujer hay otra? La biografía de la química Ellen Gleditsch deja ver que, tras uno de los mayores referentes femeninos de la historia de la ciencia, el de la mismísima Marie Curie, había otro perfil del que sabemos muy poco. La vida de esta investigadora noruega medio olvidada, que se formó en el laboratorio de la más grande y evidencia que no siempre son los logros de un hombre los que invisibilizan a los de una mujer. Las científicas de renombre también taparon a otras.

“Ellen Gleditsch trabajaba a la sombra de Marie Curie, por lo que Curie acumuló toda la fama”, explican Geoffrey y Marelene Rayner-Canham, profesores eméritos de la Memorial University of

Newfoundland (Canadá) y coautores de siete libros y diversos artículos que exploran las contribuciones de las mujeres en la ciencia, en concreto, en el área de la química. “Mucho de lo que hacía era invisible, como supervisar el laboratorio de investigación mientras Curie estaba fuera recaudando fondos”, declaran a *Alfa*.

En el área de la química atómica trabajaron activamente muchas mujeres científicas. Al nombre de Marie Curie y Lise Meitner se puede sumar el de Harriet Brooks, asistente de investigación de Ernest Rutherford y el de varias pioneras que contribuyeron a los primeros trabajos sobre los isótopos: Stefanie Horowitz, Ellen Gleditsch y Ada Hitchin.

Pan primero y luego ciencia

Ellen Gleditsch nació el 29 de diciembre de 1879 en la ciudad costera de Mandal, en el sur de Noruega. Sus antepasados, que procedían de Alemania y Dinamarca, se establecieron en el país un siglo antes de su nacimiento, cuando aún formaba

parte de Dinamarca. Su padre Karl Gleditsch, era maestro e hijo de un ministro luterano. Su madre, Petra Birgitte Hansen, tenía ascendencia noruega y era hija de un capitán de la marina. La familia era numerosa, con Ellen a la cabeza como la mayor de diez hermanos.

Los Gleditsch vivían en un bello entorno que disfrutaban llevando a los pequeños de excursión a la montaña o navegando por las aguas del Mar del Norte, hasta que se mudaron a una isla más allá del Círculo Polar Ártico, una ciudad aislada pero rica en actos culturales y bibliotecas. Ellen aprendió de sus padres tanto a observar la naturaleza, como el gusto por la música y la cultura. Su madre la animó a estudiar y fue para ella un referente en la lucha por el derecho al voto de las mujeres, la ética y el respeto por los demás. De su padre, entre otras cosas, heredó el amor por la botánica.

Esto no es de extrañar. Se da la circunstancia de que varias de las grandes figuras científicas de la historia han crecido en familias en las que ya existía una



Universidad de Kristiania, donde estudió y enseñó Ellen Gleditsch.

cierta curiosidad por la ciencia, la naturaleza o la cultura. “En los casos más conocidos que recuerdo, así fue”, dice en un breve mensaje el físico José Manuel Sánchez Ron, historiador de la ciencia y académico de la Real Academia Española.

De pequeña, Ellen Gleditsch ya destacó en las ciencias. Se graduó en 1895 con la nota más alta en matemáticas, lo que le habría permitido continuar y cursar estudios universitarios de no haber sido una niña, pues esa oportunidad solo la disfrutaban los niños. A ella el destino le reservó un puesto de trabajo en la farmacia de la ciudad de Tromsø, donde, en 1897, a modo de perfecta escuela en prácticas, aprendió del boticario los secretos del oficio.

Así se adentró en el mundo de la química. Estudió farmacología, obtuvo una titulación no académica en 1902 y, al no contar con recursos para matricularse en la universidad, continuó con su formación trabajando como ayudante de laboratorio de la Universidad de Kristiania (Oslo).

“Tenía muchas ganas de avanzar en mi educación, pero no tenía dinero y una tiene que sobrevivir, así que comencé a trabajar como tutora a la vez. Todo salió bien, pero no tuve tanto tiempo para mis estudios como hubiera deseado. Era una cuestión de pan primero y luego ciencia”. Son palabras de la propia Ellen Gleditsch, tomadas de una entrevista que dio en París años más tarde.



Ellen Gleditsch (novena por la izquierda) en la reunión de los miembros de la Comisión de Radiactividad de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), celebrada en 1953 en Estocolmo. La sexta por la izquierda es Irene Joliot-Curie.

A la sombra de Marie Curie

En 1906, Gleditsch superó el examen de ingreso de la universidad y trabajó durante un año como asistente de enseñanza del químico Eyvind Bodtker, con quien escribió su primer artículo científico, un estudio sobre química orgánica.

Sin embargo, el sueño de la joven y menuda universitaria (Gleditsch medía 154 centímetros) no era seguir en Oslo, sino trasladarse al laboratorio parisino de Marie Curie, quien la rechazó por no disponer de plazas. Mucho insistió Bodtker para que Curie le diera una oportunidad. “Mademoiselle Gleditsch es tan pequeña y ligera que no ocupará mucho espacio”, le decía en ingeniosos mensajes para conseguir que Curie cediera, lo que al final hizo, pues necesitaba un perfil con formación química como el que tenía la estudiante.

En septiembre de 1907, Gleditsch se incorporó al laboratorio de Marie Curie y empezó a estudiar en la Sorbona. Curie acababa de convertirse en la primera mujer en dirigir un laboratorio de investigación, por el que pasaron, de 1906 a

1934, 45 estudiantes e investigadores de distintos países. Gleditsch formó parte de su equipo científico hasta 1912, año en el que obtuvo su licenciatura en ciencias por la universidad parisina.

Su trabajo consistía en separar y recristalizar sales de bario que contenían algo de radio y así obtener sales de radio puro, unas valiosas sustancias que Curie solo encomendaba a Gleditsch. Esto le valió un ascenso y, en tan solo un año, se convirtió en la asistente personal de Marie Curie, que por aquel entonces ya pasaba de los 40 y llevaba un año viuda.

Las aportaciones científicas de Gleditsch en el campo de la radiactividad fueron muchas y muy variadas. En su etapa parisina con Curie, demostró que era errónea la supuesta transformación del cobre en litio basada en la teoría de Rutherford y Soddy de 1902, refutando la transmutación de los metales.

Gleditsch y Curie descubrieron que las trazas de litio en soluciones de cobre probablemente procedían del recipiente de vidrio. Además, Gleditsch investigó por su cuenta el contenido en litio de los

minerales que presentan tanto cobre como radio, lo que le llevó a afirmar que el cobre no se transforma en litio bajo la influencia de la radiación. Gleditsch también estudió la relación radio-uranio en minerales y demostró que, al contrario de lo que sostenía el radioquímico estadounidense Bertram Boltwood, esta no era constante, sino que variaba de un mineral a otro.

En 1913, Gleditsch recibió una beca para trabajar con Boltwood en la Universidad de Yale. El científico en un principio se oponía a que las mujeres investigaran, pero cambió de parecer al conocer a la noruega. De hecho, la relación entre Gleditsch y Boltwood llegó a ser “muy correcta y amistosa”, según los canadienses Rayner-Canham.

En Yale, Gleditsch se centró en la vida media del radio (^{226}Ra). Esta era una constante importante para, a su vez, calcular la vida media del uranio, que por su magnitud no era abordable, pero se podía deducir a partir de la del radio y de la relación Ra-U. Para el radio estableció un período de semidesintegración de 1.686 años (muy próximo al calculado actual, de 1.620 años). Gleditsch trató minerales que contienen uranio y torio, elementos importantes que guardan la clave de la desintegración radiactiva. También contribuyó al descubrimiento de los isótopos.

De vuelta a Oslo

Gleditsch regresó a su universidad de origen y ocupó el cargo de profesora en la Universidad de Oslo en 1916, donde siguió con su carrera. Pero no perdió su contacto con Marie Curie, quien le pi-

dió que siguiera supervisando las instalaciones de extracción de radio en Francia, lo que le obligó a realizar peligrosos trayectos el Mar del Norte, al hallarse en plena Gran Guerra.

“Gleditsch siempre estuvo agradecida a Curie por hacerle un hueco en su laboratorio. Puede que Curie se aprovechara de ese sentimiento de deuda que Gleditsch tenía con ella”, destacan los Rayner-Canham. “En particular, el pedirle a Gleditsch que regresara de Noruega durante la Primera Guerra Mundial, a pesar de que el Mar del Norte estaba lleno de submarinos que hundían barcos de pasajeros”, es una muestra del compromiso en el que Curie la ponía.

Acabado el conflicto, Gleditsch continuó estudiando isótopos radiactivos y la edad de los minerales. Investigó la

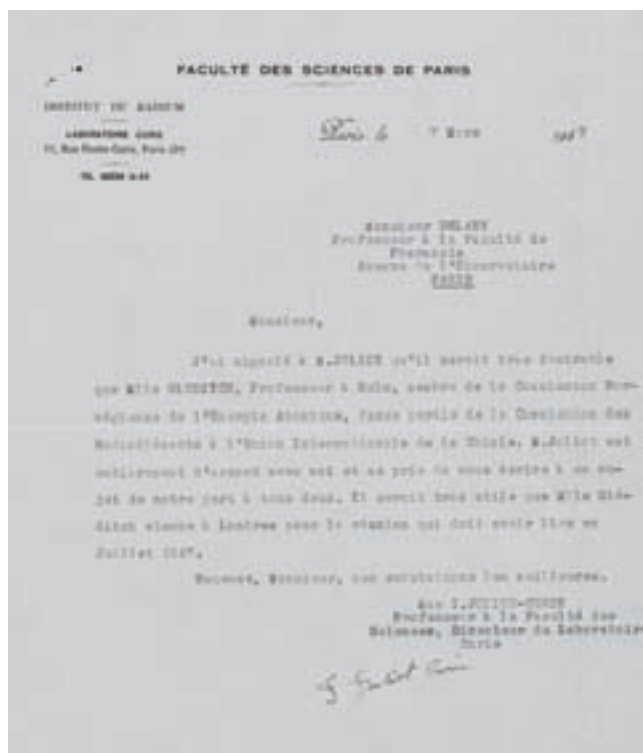
composición isotópica del plomo en la broggerita; determinó el peso atómico del cloro y el plomo; dedujo que el peso atómico promedio del cloro no varía con la fuente mineral; y demostró que las proporciones de los isótopos de los elementos (salvo el plomo) no habían cambiado desde la formación de la tierra. Su hermana Liv Gleditsch, que participó en estos experimentos, también colaboró con Ellen a fines de los años 20 en el estudio de la conductividad eléctrica de las soluciones de radón.

El nombramiento de Ellen Gleditsch para ocupar la cátedra de Química desató una fuerte polémica en Oslo. La noticia no fue bien recibida y se generó una fuerte oposición, a pesar de que no era la primera mujer en semejante puesto. La cátedra de Biología ya estaba en las

manos de otra científica, Kristine Bonnevie. El tema se mantuvo candente con debates en la prensa que se sucedieron a diario. En la comunidad científica se creó un gran revuelo y se cree que las cartas de Marie Curie a la Universidad de Oslo, destacando el conocimiento y las habilidades de Gleditsch, pudieron ayudar a que finalmente accediera a la plaza el 23 de junio de 1929.

Ya en los años 30, Ellen Gleditsch y Ernst Føyn calcularon la proporción de actinio y uranio en tierras raras y en el uranio natural, lo que les llevó a afirmar que es el antepasado de la desintegración del actinio. Además, estudió la radiactividad de las rocas y acuñó el término radiogeología. Por último, Ellen Gleditsch y T. Graf descubrieron que el isótopo de potasio ^{40}K emitía rayos gamma





Carta de Irene Joliot-Curie recomendando a Gleditsch como miembro de la Comisión de Radioelementos de la IUPAC.



Ellen Gleditsch con otra científica pionera noruega, la botánica Thekla Resvoll.

de mayor intensidad de lo que se pensaba y calcularon que el 20 % del calor de las rocas ígneas ácidas procedía de la desintegración radiactiva de este isótopo.

Dos referentes de mujer científica

Para Gleditsch, que también fue una escritora prolífica, Marie Curie fue una mentora y un modelo a seguir y dejó escritos varios ensayos sobre su valedora y su familia. En ellos decía que era una mujer “reservada”, pero que se interesaba por el trabajo de sus estudiantes y que visitaba el laboratorio a diario. Entre ambas se estableció una profunda amistad que duró hasta el fallecimiento de Marie Curie en 1934 debido a los efectos nocivos de la radiación.

En aquella época se desconocían las lesiones que producía en el organismo y no existían las medidas de seguridad con las que se trabaja ahora. La de Gleditsch fue, sin embargo, una vida larga, aunque con algunos achaques y resfriados frecuentes por la anemia que pade-

cía. Como Marie Curie, dedicó todo su tiempo a la ciencia, hasta el punto de no casarse con su prometido por no distraerse o alejarse de la investigación. Gleditsch falleció el 5 de junio de 1968 a la edad de 89 años, a consecuencia de un derrame cerebral.

Muchas son las mujeres a las que, si se les pregunta por un referente científico femenino, citan la figura de Marie Curie. La de Ellen Gleditsch es desconocida para muchas, incluso en su tierra, donde se la ha ignorado en los libros de referencia. Pero la difusión de sus logros y su lado humano siempre puede cambiar ese rumbo. Méritos no le faltan, como pionera en el descubrimiento de los isótopos, por firmar una enorme lista de publicaciones científicas, por su implicación en el acceso de las mujeres a la ciencia y por sus trabajos en la UNESCO para erradicar el analfabetismo.

Más mediática que su propia figura científica fue la labor que hizo en la divulgación de la ciencia, al escribir nu-

merosos artículos y libros o participar en charlas y programas de radio. Esta otra cara de la profesora e investigadora noruega se dibuja por su compromiso por las causas humanitarias y su activismo por la paz, que se materializó cuando escondió en su laboratorio a científicos que huían de la ocupación alemana durante la Segunda Guerra Mundial. Más tarde, formó parte de la Comisión creada para estudiar el control de la bomba atómica.

También fue una gran defensora de la educación de la mujer, animando a que emprendieran estudios superiores y apoyando su incorporación a los laboratorios. Ellen Gleditsch cofundó y presidió diversas instituciones, como la Asociación Académica de Mujeres Noruegas y la Federación Internacional de Mujeres Universitarias, con un programa de becas para que las jóvenes pudieran formarse en el extranjero. En reconocimiento de esta labor, algunas de esas becas llevan hoy su nombre. 

Reacción en cadena

NOTICIAS

Las matemáticas de las plantas

Un modelo matemático permite predecir el comportamiento de las plantas cultivadas ante situaciones estresantes como las que produce el cambio climático. El modelo se basa en el papel que juega una proteína, llamada COP1, en el crecimiento del tallo embrionario de las plantas (hipocórito) en días largos y con temperaturas elevadas y su interacción con otros factores celulares regulados por la luz. Estudiando la planta modelo *Arabidopsis thaliana*, los investigadores

del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y de la Universidad Carlos III de Madrid, desarrollaron el modelo matemático que permite conocer cómo varía el crecimiento de la planta en función de las condiciones ambientales. El objetivo es aplicar el modelo de forma eficiente en la agricultura ante el reto que supone el cambio climático.

Las plantas adaptan su desarrollo y morfología a condiciones ambientales como la duración del día y la temperatura, pero ambos factores producen respuestas diferentes, ya que la temperatura promueve el creci-



miento de la planta y la luz lo inhibe. Al aumentar la temperatura, la respuesta inicial de las plantas es alargar el tallo embrionario para mejorar el enfriamiento de las hojas y reducir el daño producido por el calor. “Las especies cultivadas muestran una variabilidad genética muy reducida en cuanto a su

capacidad de adaptación a temperaturas ambientales elevadas, que disminuyen su producción. Aquí mostramos que formas más activas de COP1 mejoran la tolerancia al cambio climático de los cultivos que requieren días largos”, señala Salomé Prat, investigadora del CSIC y miembro del equipo. ▸

¿Cayeron los continentes del cielo?

Hasta ahora se pensaba que la corteza terrestre continental era fruto de las fuerzas tectónicas; es decir, de procesos geológicos, pero un grupo de investigadores, encabezados por Chris Kirkland, de la Universidad Curtin de

Australia asegura que en la formación de los primeros continentes intervino también el impacto de numerosos cometas, en oleadas producidas cada 200 millones de años. Es el tiempo que el sistema solar transita entre los diferentes brazos en espiral de la Vía Láctea, zonas con una alta densidad de

estrellas, de las que se habrían desprendido esos cometas.

Para llegar a esa conclusión, los científicos han estudiado minerales de diferentes lugares de la superficie terrestre y han encontrado firmas isotópicas peculiares en zonas tan distantes como Groenlandia y Australia, con periodos de deposición que coincide con esos 200 millones de años. Según Kirkland, “nuestro estudio revela una excitante conexión entre los procesos geológicos terrestres y el movimiento del Sol en nuestra galaxia”. La investigación, en la que han participado también investigadores de la Universidad Lincoln, la NASA y el Servicio Geológico Australiano, se ha publicado en la revista *Geology*. ▸



Superimanes para la fusión nuclear

El Laboratorio de Alto Campo Magnético de la Academia de Ciencias de China aseguró el pasado agosto haber conseguido el imán de estado estacionario más potente del mundo, capaz de generar un campo magnético de 45,22 teslas (T), aproximadamente un millón de veces más potente que el campo magnético terrestre. Sin embargo, científicos del Laboratorio Nacional de Alto Campo Magnético de Florida, en EE.UU., publicaron en *Nature* en junio de 2021 que habían conseguido uno de 45,5 T. Más allá de adjudicarse el hueco en el Guinness, la batalla por conseguir imanes de tanta potencia tiene objetivos prácticos, ya que se podrán aprovechar en numerosas aplicaciones, entre las que destaca la fusión nuclear. Este mismo verano, el Laboratorio de Física del Plasma



de Princeton, del Departamento de Energía de EE.UU. anunció que había encontrado una forma de construir imanes muy potentes y mucho más pequeños. Aumentar la potencia y reducir el tamaño de los gigantescos imanes superconductores que envuel-

ven la cámara de un reactor de fusión, como el proyecto internacional ITER, que se está construyendo en Cadarache (Francia), contribuiría a incrementar su eficiencia y reducir el coste energético. Los nuevos imanes, mucho más potentes que los que

equipan el ITER podrán ser utilizados en el siguiente reactor de fusión, el DEMO, que deberá ser el prototipo para los reactores comerciales de fusión nuclear, cuya construcción no empezará hasta los años cuarenta, como muy pronto.

EFEMÉRIDES ► HACE 75 AÑOS...

Se descubre el pion, mediador de la interacción fuerte

Los núcleos atómicos están formados por neutrones y protones, que se mantienen compactados por el intercambio constante de una partícula denominada pion, que actúa como portadora de la interacción nuclear fuerte, una de las cuatro fuerzas o interacciones reconocidas por el modelo estándar de la física, junto a la nuclear débil, la electromagnética y la gravitatoria. La existencia de esa partícula fue predicha por el físico japonés Hideki Yukawa en los años 30 del siglo XX y en 1947, hace 75 años, el inglés Cecil Frank Powell consiguió detectar la partícula utilizando un sistema de placa con emulsión fotosensible en lugar de una cámara de niebla. Dado que tenía una masa intermedia entre el electrón y el protón, la incluyó en el grupo



Hideki Yukawa.



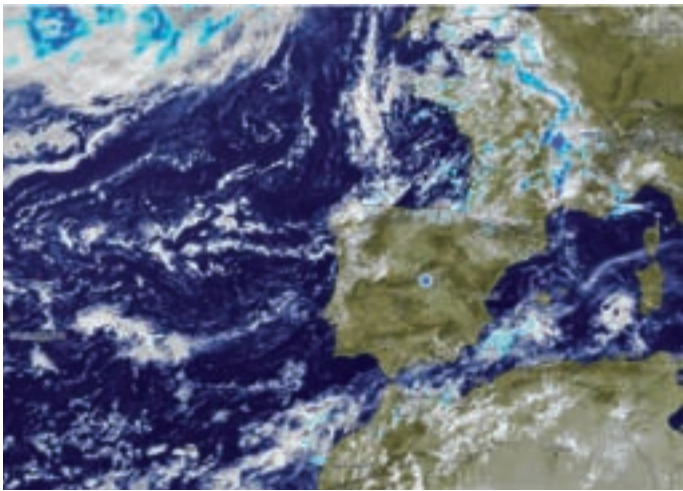
Cecil Frank Powell.

de los mesones y le dio el nombre de pi-mesón, que luego acabaría reduciéndose a pion. Yukawa recibió el premio Nobel en 1949 por su predicción y Powell en 1950 por la detección.

EN RED

Algo más que el pronóstico del tiempo

Además de proporcionar las predicciones del tiempo de los próximos días, con cierto grado de detalle, la web Meteoblue proporciona muchísima más información y presentada de una forma muy entretenida, especialmente utilizando sus diferentes mapas (de temperatura, precipitaciones, humedad, vientos...) con imagen de



satélite. Mediante la herramienta de zoom se puede ver el mapa de la Tierra entera o acercarse hasta cualquier punto de la superficie terrestre. Pinchando en el lugar escogido nos proporciona el meteograma del lugar, es decir, la predicción del tiempo de los próximos días. Dispone además de información especializada para determinados ámbitos, como la agricultura y la aviación o de interés para deportistas y elección de destino turístico. Entre otras cosas, permite acceder a datos históricos del tiempo de un lugar y ofrece amplia información sobre clima y cambio climático, imágenes de webcams de la zona elegida o cercana y otras posibilidades.
<https://www.meteoblue.com/es/tiempo/espaa%C3%B1a>

Visitas virtuales de Egipto a la Antártida

La empresa Matterport está especializada en la realización de vídeos 3D y recorridos virtuales 360° que ofrece por interés comercial; pero también recopila, a modo de ejemplo, decenas de recorridos por lugares de enorme atractivo que uno puede visitar casi como si realmente se encontrara allí. Entre los icónicos lugares se encuentran la casa de Mark Twain, la tumba de la reina egipcia Meresankh III, el templo de Venus de Pompeya, la iglesia

Biserica Flamanziel en Rumanía, el templo egipcio de Abu Simbel y la pagoda de Thitsarwaddy de Myanmar. Se puede pasear por el templo de Zenkoji, en Japón, visitar la Antártida a bordo de un barco, observar Londres desde lo alto de la torre de la televi-

sión de la capital británica, descubrir los jardines botánicos de Bayreuth en Alemania, recorrer una galería de arte que exhibe posters curiosos, o entrar en la prehistórica construcción Carn Euny, en Inglaterra. Los recorridos permiten personalizar la visita, girar la cámara en cualquier dirección y moverse por el espacio visitado.

<https://matterport.com/discover/collection/b9783d84-a92e-4d81-9fa6-602add89b01a>



Abu Simbel Temple - معبد أبو سمبل

REDES



@QuoRevista

La actualidad científica y las más insospechadas curiosidades servidas diariamente por una de las revistas más veteranas de la divulgación en España.



Elfisicobarbudo

Aunque puede parecer difícil hacer divulgación en menos de un minuto algunos, como El Físico Barbudo, lo consiguen con píldoras de curiosas experiencias muy accesibles.



Señalética For Dummies

Este grupo de Facebook, de acceso libre, recopila imágenes de señales, carteles, anuncios y avisos; a veces por su interés comunicativo o estético, otras por divertidos errores.



QuantumFracture

Tres millones de seguidores avalan el trabajo del físico José Luis Crespo, que lleva diez años divulgando su disciplina con vídeos de YouTube contruidos a base de animaciones, lo que facilita la comprensión de los más complejos conceptos.



@zooborns

Este perfil de Instagram está especializado en mostrar la tierna imagen de crías recién nacidas de todo tipo de animales, obtenidas en zoológicos y acuarios de todo el mundo.

Museo de la Evolución Humana

Paseo Sierra de Atapuerca s/n
Burgos

T: 947 421 000 / 947 421 811

www.museoevolucionhumana.com/

Los hallazgos realizados en los yacimientos de Atapuerca, que conforman el mayor conjunto mundial de restos paleontológicos de homínidos del último millón de años, han encontrado hogar en el Museo de la Evolución Humana, levantado en Burgos e inaugurado en 2010. Su contenido excede sobradamente el ámbito de Atapuerca y abarca todo el proceso de la evolución, desde hace millones de años, del grupo en el que se inscribe nuestra especie. De forma atractiva y didáctica nos permite acceder a yacimientos de todo el mundo, a la explicación de cómo se realizan las excavaciones, cómo se interpretan los restos y como se va conformando el árbol genealógico humano. Dotado de unas instalaciones amplias, una arquitectura espectacular y luminosa y una museografía moderna, en él



NACHOSAN

se pueden apreciar algunas de las piezas más emblemáticas de Atapuerca, como los restos de *Homo antecessor* y de *Homo heidelbergensis*, que vivieron en la sierra burgalesa en muy diferentes épocas, así como reproducciones de todas las especies que conforman la

evolución humana. Además, la jornada se puede completar con una visita a los propios yacimientos de Atapuerca, para lo cual conviene reservar plaza llamando a los teléfonos arriba indicados o escribiendo a reservas@museoevolucionhumana.com. ▶

LIBROS

Historia del futuro. Utopías y distopías después de la pandemia.

Pablo Francescutti
Editorial Comares, 2021
188 páginas

Intentar anticipar el futuro ha sido una constante en la historia de la humanidad, siempre preocupada por la incertidumbre inhe-

rente al devenir. Augures, astrólogos, oráculos y profetas han intentado a lo largo de los siglos dar respuesta a esta inquietud, con resultados poco afinados. Hoy la ciencia ocupa su lugar y aplica el conocimiento para cumplir esa misión bajo el nombre de prospectiva. Con la excusa de la ciencia se construyen promesas utópicas o se solemnizan distopías en tecnología, energía, medicina,

medio ambiente y otros ámbitos y se mezclan con intereses sociales, políticos o económicos. Pero rara vez los pronósticos se cumplen y surgen elementos inesperados, como la pandemia, que lo trastocan todo. En este libro, el periodista y sociólogo Pablo Francescutti traza un recorrido por la historia de las visiones de futuro de las sociedades y explica cómo intentamos, de nuevo, an-



tipicar el porvenir ante las numerosas crisis que nos asolan actualmente. ▶

Panorama

El CSN envía al Parlamento el informe de actividades de 2021

El 6 de septiembre el Consejo de Seguridad Nuclear remitió al Parlamento su informe anual con el detalle de las actividades desarrolladas durante 2021, en el que destaca el correcto funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas españolas durante ese ejercicio. En el ámbito nuclear, el regulador informó favorablemente las solicitudes de renovación de las autorizaciones de explotación de las centrales nucleares Cofrentes (Valencia) y Ascó (Tarragona) y el Almacén Temporal Individualizado de Cofrentes, para el almacenamiento en seco del combustible gastado. En protección radiológica el informe destaca el primer licenciamiento de una instalación de rayos X para esterilización de sangre en España y del primer sistema de radioterapia de precisión molecular guiada por resonancia magnética. También destaca la nueva Red de Estaciones Automáticas de vigilancia radiológica, con 185 estaciones.

Durante 2021 el Consejo puso en marcha su nueva sede electrónica, que facilita el acceso a los servicios del regulador por parte de ciudadanos, empresas e instituciones. En el plano



internacional, destaca el acuerdo firmado con la Agencia Portuguesa de Medio Ambiente para reforzar la cooperación entre ambos países en protección radiológica y seguridad nuclear. ►

23ª reunión del Comité Asesor

El 30 de junio se reunió el Comité Asesor para la Información y la Participación Pública del Consejo, que se celebró mediante videoconferencia, para tratar sobre los retos del regulador y su relación con la sociedad. Presidió la reunión Juan Carlos Lentijo, presidente del CSN, acompañado de los consejeros Javier Dies y Elvira Romera, el secretario general, Pablo Martín y los directores técnicos de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica. Durante la reunión se presentó el Código Ético 2020-2025, actualizado en febrero, y el nuevo Manual de Estilo del regulador. También se informó de los avances producidos en torno a las doce recomendaciones que el Comité ha formulado al CSN. Durante el último año se han cerrado cuatro de las cinco que estaban pendientes. ►



El Consejo dona un centenar de dosímetros a Ucrania

Dentro de la respuesta europea de apoyo a Ucrania, el Consejo de Seguridad Nuclear donó el pasado mes de julio a las autoridades ucranianas un cargamento de 100 dosímetros de lectura directa DMC2000S, para garantizar la seguridad de las instalaciones nucleares del país y como medio de protección de sus trabajadores y de la población. La donación se realizó de forma coordinada con el OIEA, el Ministerio de Exteriores y la Unión Europea. Además, el Consejo de Ministros aprobó una donación de 250.000 euros al OIEA para las actividades de ayuda a la seguridad de las instalaciones nucleares del país. ►

Nombramiento de los nuevos directores técnicos del Consejo

El 12 de julio, el Consejo de Ministros nombró a María Teresa Vázquez Mateos y a Javier Zarzuela Jiménez directores técnicos de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, respectivamente, del Consejo de Seguridad Nuclear; cargos que ya ostentaban en funciones. Ambos pertenecen al cuerpo técnico del CSN. Teresa Vázquez es ingeniera industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. En 1989 ingresó en el Consejo, donde ha desarrollado su carrera profesional en diversos puestos, como jefa de proyecto de la central nuclear Cofrentes, jefa del área de análisis probabilista de seguridad y subdirectora de Tecnología Nuclear. Javier Zarzuela es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Autónoma de Madrid y se incorporó al CSN en 1983, donde ha desempeñado, entre otros cargos, el de inspector residente en las centrales nucleares Ascó y Almaraz, jefe de área y coordinador de pro-



yectos, subdirector de Instalaciones Nucleares y subdirector de Protección Radiológica Operacional.

Madrid acogió la celebración de los 25 años del FORO Iberoamericano

El 22 de julio se celebró una jornada conmemorativa del XXV aniversario de la creación del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO). El acto, organizado por el Consejo de Seguridad Nuclear, que ostentaba la presidencia de la institución, se celebró en la sede de la Secretaría General Iberoamericana Casa de América. Durante su intervención, el presidente del CSN y del FORO, Juan Carlos Lentijo, subrayó que la asociación es un caso de “éxito colectivo”. También participaron los consejeros del CSN, los representantes de los reguladores iberoamericanos y el director general del OIEA, Rafael Grossi. Durante el evento, se traspasó la presidencia del FORO a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias de México.



Primeras jornadas informativas a la población del acuerdo CSN-AMAC

Almaraz el 7 de julio y Garoña el 14 del mismo mes inauguraron la serie de jornadas informativas destinadas a la población de las zonas cercanas a las instalaciones nucleares, fruto del convenio de colaboración firmado entre el Consejo de Seguridad Nuclear y AMAC el pasado abril. El objetivo es dar a conocer aspectos sobre seguridad nuclear y protección radiológica de las centrales nucleares, la preparación y respuesta en caso de emergencia, el papel de las distintas administraciones en esta materia y la gestión de residuos radiactivos, combustible gastado y su almacenamiento. En la jornada de Almaraz participaron el alcalde de la localidad, Juan Antonio Díaz, el consejero del CSN Javier Dies y el presidente de AMAC, Pedro Sánchez. En el caso de Garoña participaron la alcaldesa de Valle de Tobalina, Raquel González; el consejero del CSN Francisco Castejón, y el presidente de AMAC. En ambos casos participaron también varios técnicos del Consejo.

Principales acuerdos del Pleno

Curso sobre intervención en emergencias radiológicas

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear en su reunión del 7 de septiembre aprobó la contratación de tres ediciones de un curso de formación para personal de intervención en emergencias radiológicas en la Escuela Nacional de Protección Civil y Emergencias (ENPCE). Se contratará a una empresa externa para que planifique, organice, gestione, imparta y evalúe el curso, bajo la supervisión del regulador. Su objetivo es asegurar la correcta respuesta en caso de emergencias, con el fin de garantizar la protección radiológica de los ciudadanos y del medio ambiente ante este tipo de situaciones.

Revisión de las ETF mejoradas de la central nuclear Almaraz

En su reunión del 2 de septiembre, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear informó favorablemente la solicitud presentada por la central nuclear Almaraz (Cáceres) para la revisión de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas de sus dos unidades. El objetivo de la propuesta es garantizar que las operaciones de manejo del contenedor cargado con combustible con bajo grado de exfoliación cumplan los criterios establecidos en el documento "Control de cargas pesadas en centrales nucleares: resolución de actividad técnica genérica A-36 (NUREG-0612) de la NRC.

Plan de emergencias de la central nuclear José Cabrera

Durante la reunión del 27 de julio del Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear se aprobó informar favorablemente la modificación del Plan de Emergencias Interior de la central nuclear José Cabrera

(Guadalajara), actualmente en desmantelamiento, para desvincularlo del Plan de Emergencias Exterior de Guadalajara (PENGUA), de competencia Estatal, e incorporarlo al Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Radiológico de Castilla-La-Mancha (RADIOCAM), de competencia autonómica. El cambio atiende a la situación actual de desmantelamiento y clausura de la instalación, de acuerdo con la Directriz Básica de Riesgos Radiológicos.

Reglamento sobre protección de la salud ante la exposición a radiaciones ionizantes

También en su reunión del 27 de julio, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear emitió el preceptivo informe sobre el proyecto de Real Decreto que recoge el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, como parte de la transposición al marco regulador español de la Directiva 2013/59/Euratom sobre normas básicas de seguridad para la protección contra las radiaciones ionizantes.

Cambios solicitados por la central nuclear Trillo

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 20 de julio, acordó informar favorablemente dos solicitudes presentadas por el titular de la central nuclear Trillo (Guadalajara). La primera plantea un cambio en las ETF de la instalación, para trasladar al Manual de Requisitos de Operación las especificaciones que no cumplen con los criterios de inclusión en este documento establecidos en el apartado 4.2. de la Instrucción del CSN IS-32. La segunda se refiere a la modificación del límite de deformación plástica de la vaina

del combustible suministrado por Framatome del 2,5 % actual al 3 %.

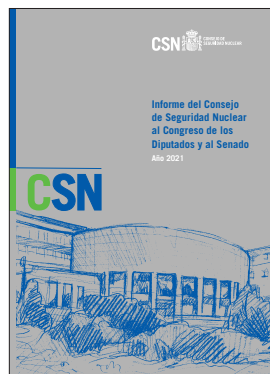
Desclasificación de materiales residuales en Vandellós II

El 29 de junio, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, aprobó informar favorablemente la solicitud presentada por Asociación Nuclear Ascó-Vandellós sobre el proceso de desclasificación de materiales residuales metálicos y de otros no metálicos de Vandellós II (Tarragona), de acuerdo con las condiciones establecidas previamente por el CSN, a partir de los resultados del plan de pruebas para la desclasificación de residuos llevado a cabo por el titular en 2018. El dictamen actualiza el condicionado emitido entonces, que insta al titular a remitir al regulador un informe anual sobre los procesos de desclasificación realizados en el año anterior.

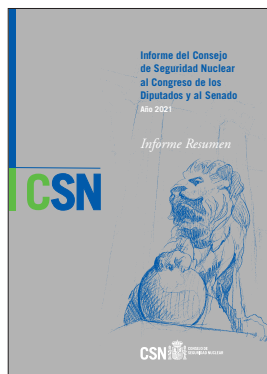
Participación del CSN en el proyecto FIDES de la NEA/OCDE

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó, en su reunión del 22 de junio, un acuerdo con la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (NEA/OCDE) para la participación del CSN en el proyecto internacional Framework for Irradiation Experiment (FIDES) durante 2021-2023. También aprobó el convenio con ENUSA y Ciemat para la participación conjunta en este proyecto como consorcio español, en el que el CSN actuará como representante. El objetivo del proyecto es continuar los trabajos de I+D realizados durante el Programa HALDEN, en el que las tres instituciones españolas participaron desde 2009. FIDES consta de cuatro proyectos sobre materiales y combustible, todos ellos relacionados con las líneas de investigación establecidas en el vigente Plan de I+D del CSN. 

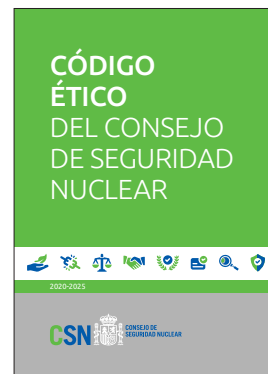
Publicaciones



**Informe del Consejo de Seguridad Nuclear
al Congreso de los Diputados y al Senado
Año 2021**



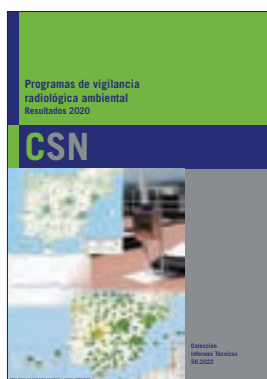
**Informe del Consejo de Seguridad Nuclear
al Congreso de los Diputados y al Senado
Año 2021
Informe Resumen**



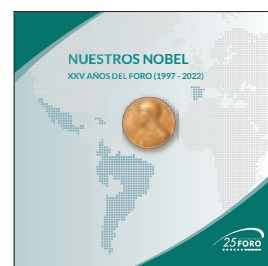
**Código ético del Consejo
de Seguridad Nuclear
2020-2025**



**Intercomparación analítica entre
laboratorios de radiactividad ambiental
2019 (Agua)**



**Programas de vigilancia radiológica
ambiental
Resultados 2020**



**Nuestros Nobel
XXV años del Foro (1997-2022)**

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 The neutron paradise

In 2027, the world's most powerful neutron generating installation will start operation. The facility in question is the European Spallation Source (ESS), which is being built in Lund, in Sweden, a latest generation multidisciplinary research centre that will make it possible to look inside matter in great detail.

12 25 years of the Latin American FORUM (FORO Iberoamericano)

In 1997, a small number of radiological and nuclear regulators from Latin American countries decided to set up one of the first associations in that field, with a view to exchanging information, sharing experiences and carrying out mutually interesting R&D projects. A quarter of a century later, FORO has become an international reference.

33 The eternal pandemic

Although the number of covid-19 infections and the gravity of those affected have decreased significantly, a high percentage of patients continue to suffer serious symptoms and aftereffects. This is what is known as long covid. Science is looking for an explanation and a way of combating the problem.

39 The importance of size

In 2019, the new definition of one of the seven basic magnitudes of the International Measurement System came into force, specifically the kilogram or unit of mass. It was the last magnitude still to be defined using a physical pattern, a model. The new definition depends on a constant of nature that bears the name of Max Planck.

52 Monsters, apocalypse and poetic licence

Since the mid 20th century, the cinema and television have used nuclear energy to give some scientific sense to extraordinary phenomena, such as the threat of massive destruction by a nuclear war, catastrophic accidents and superheroes endowed with stunning powers due to the effects of radiation.

58 Ellen Gleditsch, pioneer in radioactivity research

This Norwegian chemist, forgotten for decades, even in her own country, worked at Marie Curie's laboratory as her personal assistant. Among other things, she contributed to demonstrating the existence of isotopes, calculated the ratio of radium to uranium in minerals and refuted the idea of lithium arising from irradiated copper.

RADIOGRAPHY

26 The International Nuclear and Radiological Events Scale (INES)

The INES scale is used to inform the public rapidly and in a coherent manner of the safety significance of events associated with nuclear facilities and the use of radiation sources and allows an immediate assessment to be obtained at a glance.

INTERVIEW

28 María Teresa Macías, president of the Spanish Radiological Protection Society

"Any work performed with ionising radiations must be subject to the basic principle of justification."

TECHNICAL ARTICLES

18 Phases 1 and 2 of the OECD/NEA HYMERES project on containment experiments for reactor safety

The OECD/NEA launched the HYMERES project in order to determine the risk of hydrogen combustion occurring during a core meltdown accident. The CSN has participated in both phases of the project, which has allowed it to access the latest experimental results on the distribution of gases in the containment atmosphere.

44 CSN plan to improve the safety systems of industrial radiography and scintigraphy operating facilities

Adequate radiological protection in fixed industrial radiography and scintigraphy (bunker) operations requires proper working procedures and a suitable bunker safety system. The CSN has approved a Complementary Technical Instruction defining the minimum requirements to be met.

¡Conecta con nosotros!



https://twitter.com/CSN_es



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



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



<http://www.csn.es>