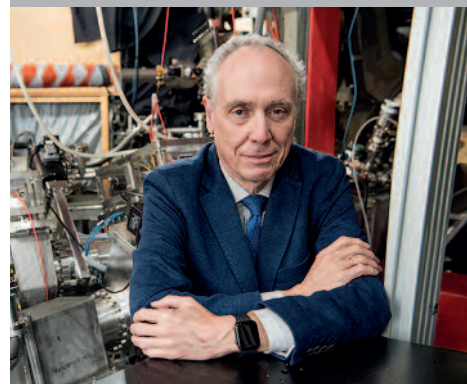


Terapia de protones para curar los tumores



Centrales nucleares flotantes para uso civil

Carlos Alejandre,
director del Ciemat



“A las renovables les
quedan grandes retos”



Descubre la web del Consejo de Seguridad Nuclear.
Los mejores contenidos, la mejor usabilidad
y un diseño *responsive* que se adapta a todas
las pantallas y terminales inteligentes.

Toda la información sobre seguridad nuclear y protección
radiológica, de la mano del organismo regulador,
a tu alcance.



www.csn.es

La protonterapia para tratar el cáncer ya es una realidad en nuestro país

En septiembre de año pasado el Consejo de Seguridad Nuclear licenció, por primera vez en nuestro país, una instalación destinada a la protonterapia. En este número 40 de la revista ALFA hacemos un recorrido sobre cómo funciona este tipo de infraestructuras que buscan luchar contra el cáncer de una forma segura y efectiva para los pacientes. En la actualidad, se encuentran en funcionamiento 79 centros dedicados a esta terapia y repartidos en 20 países. En un futuro no muy lejano, serán 43 instalaciones más las que se pongan en funcionamiento para llegar a atender a los 300.000 pacientes anuales que se estiman que necesitarán este tipo de tratamiento en 2030.

Hasta llegar a la protonterapia, muchas han sido las investigaciones que se han llevado a cabo con el uso de las radiaciones ionizantes, especialmente en la industria. Aprovechamos esta edición de ALFA para echar la vista atrás y repasar los nombres que han formado parte de la investigación atómica en España con el artículo *Los precursores del átomo*. Como señaló Juan Antonio Kindelán, ex presidente del CSN, en el vigésimo aniversario del organismo regulador: “la historia nuclear española podría definirse en dos grandes

capítulos. El primero, se caracterizó por el surgimiento de la industria nuclear, su consolidación y la puesta en marcha de la mayor parte de las centrales nucleares españolas. El segundo, se ha caracterizado por la estabilización del sector”.

Relacionado con las centrales nucleares, este número 40 nos acerca a una de

En este número de la revista 'Alfa' hacemos un recorrido sobre cómo funcionan las instalaciones de protonterapia, que buscan luchar contra el cáncer de una forma segura y efectiva para los pacientes

los mecanismos más novedosos de este tipo de instalaciones: la gestión de los gases combustibles a través de los recombinautores autocatalíticos pasivos, también conocidos como PAR. La instalación de este tipo de equipos se llevó a cabo tras el accidente de Fukushima y disfruta de una consideración especial, pues su función

es doble. Por un lado, protege la integridad de la contención de la central y, por otro, reduce las concentraciones de hidrógeno evitando que los equipos, sistemas y componentes se vean gravemente afectados en caso de un accidente severo.

Las páginas de la entrevista están dedicadas a Carlos Alejandre, director del Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales (CIEMAT), cuya carrera está ligada a la fusión nuclear y a la institución a la que volvió tras desempeñar el puesto de director adjunto de seguridad nuclear en el proyecto ITER que se está construyendo en Cadarache (Francia).

En los reportajes divulgativos de ALFA podemos encontrar la historia de la primera central nuclear flotante. El barco que la transporta se ha construido en Rusia, entre 2007 y 2018 y cuenta con dos reactores de 35 MW cada uno. Con esa capacidad, podrían suministrar electricidad a una población de unos 100.000 habitantes.

Además, nos pondremos al día en cuanto a las investigaciones relacionadas con las baterías. El gran reto se afronta en la rapidez de carga, mayor capacidad y un peso reducido sin que todo ello suponga unos elevados costes en la producción y que se trasladen al usuario.

alfa

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 40 / Año 2019

Comité Editorial

Josep Maria Serena i Sender
Pilar Lucio Carrasco
Rafael Cid Campo
M^a Fernanda Sánchez Ojanguren
David Redoli Morchón
Ángel Laso D'Lom
Felipe Teruel Moya

Comité de Redacción

Ángel Laso D'Lom
Natalia Muñoz Martínez

Juan Enrique Marabotto García
Manuel Aparicio Peña
Felipe Teruel Moya

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

Estugraf Impresores S. L.
Pol. Ind. Los Huertecillos, Nave 13
28350 Ciempozuelos (Madrid)

Fotografías

CSN, Estugraf, Miguel G. Rodríguez,
Agencias (ThinkstockPhotos, Getty)

Impresión

Estugraf Impresores S. L.
Pol. Ind. Los Huertecillos, Nave 13
28350 Ciempozuelos (Madrid)

Fotografías de portada Agencias

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



06 En marcha la primera central nuclear flotante para uso civil

Rusia ultima la primera central nuclear flotante, cuyo reactor ha pasado con éxito todos los ensayos a finales de abril de este año. En un país con ciudades en algunas de las regiones más inhóspitas del planeta, este tipo de pequeñas instalaciones ofrecería una alternativa más flexible a la construcción de otros tipos de centrales de producción eléctrica. El barco, bautizado como Akademik Lomonosov, fue construido entre 2007 y 2018 y cuenta con dos reactores, de 35 MW cada uno.

20 Eduardo Torroja, el genio más allá del tablero

Dentro de las disciplinas científicas, la ingeniería goza de una posición un tanto peculiar; su relación de hermanamiento con la arquitectura, tiende a difuminar el concepto en la mente popular, mezclando una cosa y otra, cuando lo cierto es que muchos campos de la ingeniería no tienen ninguna relación con el diseño y la edificación de estructuras. Las grandes obras de la ingeniería civil configuran un museo al aire libre que se extiende por todos los rincones de una ciudad o un país. Como el acueducto de Tempul, en Jerez de la Frontera, un referente para el gran público, puesto que fue la primera gran obra concebida por Eduardo Torroja.



26 Baterías: el reto está en la carga rápida

Baterías con mayor capacidad y con menor peso y tiempo de carga han posibilitado la penetración del vehículo eléctrico. Pero mantienen sus mayores problemas por autonomías insuficientes, tiempos de recarga elevados o costes de producción más altos que un coche convencional. Gran parte de estos problemas son originados por los acumuladores de electricidad, que aún no son capaces de ofrecer todas las prestaciones que necesitan para competir con los motores tradicionales de combustión.

44 Los precursores del átomo

Tras unos inicios voluntariosos pero errados, y una época de abandono y desinterés culminada por la Guerra Civil, España pudo recuperar los años perdidos en la carrera de la ciencia nuclear gracias a una afortunada serie de coincidencias internacionales y al valioso papel jugado por varias figuras, a veces sólo tangencialmente ligadas al mundo científico.



RADIOGRAFÍA

52 ¿Qué son los piezómetros?

La hidrogeología es la ciencia que estudia el movimiento del agua subterránea, su composición química, el origen (en el ciclo hidrológico) y su evolución, así como los posibles usos potenciales. El piezómetro es uno de los instrumentos que se utiliza para determinar la presión de agua en el terreno o el nivel de agua en perforaciones.

ENTREVISTA

14 Carlos Alejandre, director del Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales (CIEMAT)

La extensa e internacional carrera científica del físico Carlos Alejandre (Zaragoza, 1952) está íntimamente ligada a la investigación en fusión nuclear y al Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales, desde el que lideró en los años ochenta el desarrollo, la construcción y explotación científica de un reactor experimental de fusión, el TJII, que sigue en activo.

ARTÍCULOS TÉCNICOS

36 Instalaciones de Protonterapia. Requisitos de protección radiológica

La protonterapia será una realidad en nuestro país antes de que acabe este año, una alternativa avanzada, segura y efectiva para luchar contra el cáncer. Este sistema supone toda una revolución en el ámbito de la radiooncología y emplea, para ello, un haz de protones para "esculpir con radiación el tumor sin necesidad de dañar el tejido sano".

54 La gestión de los gases combustibles con recombinedores autocatalíticos pasivos

Tras el accidente ocurrido en la central nuclear de Fukushima Dai-ichi (Japón), los países de la Unión Europea sometieron a sus centrales a un conjunto de 'pruebas de resistencia' para comprobar su capacidad de afrontar situaciones semejantes a las ocurridas en Japón. Como resultado de las pruebas, las centrales nucleares españolas identificaron diversos aspectos de mejora entre los que cabe destacar la instalación de un sistema de Recombinadores (de hidrógeno) Pasivos Autocatalíticos (PAR).



- 61 Reacción en cadena
- 64 Panorama
- 68 Acuerdos de Pleno
- 69 csn.es
- 70 Publicaciones



El reactor de este proyecto único ha pasado con éxito los ensayos

Rusia pone en marcha la primera central nuclear flotante para uso civil



Rusia ultima la primera central nuclear flotante, cuyo reactor ha pasado con éxito todos los ensayos a finales de abril de este año. En un país con ciudades en algunas de las regiones más inhóspitas del planeta, este tipo de pequeñas instalaciones ofrecería una alternativa más flexible a la construcción de otros tipos de centrales de producción eléctrica. El barco,

bautizado como Akademik Lomonosov, en honor al científico ruso del siglo XVIII Mijail Lomonosov, fue construido entre 2007 y 2018 y cuenta con dos reactores de 35 MW cada uno. Con esa capacidad, podrían suministrar electricidad a una población de unos 100.000 habitantes.

■ Texto **Daniel Mediavilla** | Periodista | ■

Después de los primeros reactores experimentales y la construcción de bombas atómicas, los usos iniciales de la energía nuclear se desarrollaron a bordo de submarinos y portaaviones. De hecho, la elección de un Reactor de Agua Presurizada para incluir en el submarino USS Nautilus, una decisión en la que tuvo gran influencia el almirante de la marina Hyman G. Rickover, orientó durante décadas el camino que seguiría la industria nuclear para usos civiles.

El buque fue construido durante la última década en los astilleros bálticos de San Petersburgo y desde allí partió hacia la ciudad de Murmansk, la mayor urbe del planeta al norte del círculo polar Ártico. Esta ciudad albergó la base de rompehielos y submarinos nucleares durante los años de la Unión Soviética y donde quedaron, tras la caída del imperio comunista, más de 200 reactores nucleares que dismantelar. En este epicentro mundial de la navegación con propulsión atómica, el Akademik Lomonosov comenzó a cargar su combustible nuclear entre julio y octubre del año pasado. En noviem-

bre, comenzó la puesta a punto del barco para tenerlo listo para el comienzo de sus operaciones comerciales. En diciembre, los dos reactores se pusieron a funcionar al 10 por ciento de su capacidad y las pruebas continuarán hasta el próximo verano. Entonces, la embarcación será remolcada hasta su destino, la localidad ártica de Pevek, la más septentrional de Rusia. Una vez allí, se conectará a las redes eléctrica y de calefacción para comenzar a funcionar con normalidad a finales del año. Su energía reemplazará a la producida por la central térmica de Cháunskaya y a la nuclear de Bilíbino.

Rosatom, la corporación estatal que regula las operaciones nucleares en el país, tenía planes desde hace tiempo para poner en marcha plantas móviles pequeñas, con el objetivo de satisfacer las necesidades de las localidades más remotas. Para ellos, la energía nuclear sería también una forma de reducir las emisiones con efecto invernadero que provocan el cambio climático y proporciona además flexibilidad y una autonomía notable. Los reactores del Akademik Lomonosov pueden operar

sin necesidad de volver a cargar combustible durante más de tres años.

Moscú no es el único país que se ha planteado la construcción de centrales nucleares flotantes, aunque, con permiso de EE.UU, ha sido el primero en llevar a cabo el plan. El país norteamericano construyó hace más de medio siglo el MH-1A Sturgis, una central nuclear itinerante que fue remolcada hasta la zona del Canal de Panamá, donde produjo electricidad entre 1968 y 1976. También en Norteamérica, la compañía Westinghouse diseñó dos plantas flotantes para colocar en la costa del estado de Nueva Jersey, pero nunca se construyeron.

Negocio potencial

Ahora, dos compañías chinas están construyendo instalaciones similares y en EE.UU, instituciones como el Massachusetts Institute of Technology (MIT), también tienen equipos que han diseñado proyectos parecidos. En opinión de estos expertos, la colocación de reactores nucleares en barcos puede ayudar a reducir los costes de producción. En la experien-

cia de los últimos años, al menos en EE.UU., los sobrecostes de los proyectos y la oposición política ha detenido prácticamente la construcción de nuevas centrales nucleares. La posibilidad de ensamblar estas centrales flotantes en astilleros las haría más baratas. Además, estas instalaciones podrían producir una energía sin gases de efecto invernadero y con una producción que no depende de las circunstancias ambientales como la energía eólica o la solar. Para Rosatom, esta planta servirá de modelo para el negocio potencial, como puede ser construir otras parecidas para otros países, tanto para venderles el barco



El buque experimental Akademik Lomonosov, construido para el gigante ruso de la energía nuclear Rosatom, ha superado todas las pruebas que ha puesto a prueba la viabilidad económica de la citada planta.



Desde que el reactor nuclear fuera cargado con combustible en mayo de 2018 ha demostrado seguridad y fiabilidad, señala el comunicado emitido a finales de abril por Rosenergoatom, división de electricidad de Rosatom.

con los reactores como para colocarlo junto al territorio al que se quiera proveer electricidad y vendérsela.

Según explican los responsables del proyecto, “las soluciones tecnológicas para los componentes de la central nuclear flotante están basadas en una tecnología utilizada en los rompehielos nucleares desde 1988”. Los rompehielos Taimyr y Vaigach, con una amplia experiencia surcando las aguas heladas del Ártico, se utilizaron como prototipos. Los responsables de Rosatom aseguran que los reactores de estos barcos han funcionado sin sufrir un fallo durante varias décadas en las condiciones extremas del polo y una unidad similar ha operado durante muchos años sin problemas en el buque Sevmorput. “Además, hay que señalar que las tecnologías de las instalaciones de los reactores para la flota de rompehielos están siendo mejorados constantemente y han experimentado avances cuantitativos desde 1988”, añaden.

Impacto medioambiental

Otro de los objetivos de la construcción del barco es la reducción del impacto medioambiental de la producción de electricidad. Se estima que cada día de operación de la central flotante reduce el consumo de carbón en 200.000 toneladas y el de petróleo, en 120.000, directamente o a través del ahorro de gas, algo a lo que las autoridades

rusas atribuyen gran importancia debido a los acuerdos del clima de París. Además, la energía del Lomosonov mejorará las condiciones energéticas de los habitantes de regiones remotas y facilitará la ampliación de los proyectos de la industria minera. “La principal ventaja es que una vez que se han superado las etapas de puesta en mar-

Los componentes de la central nuclear flotante están basados en una tecnología utilizada en los rompehielos nucleares desde 1988

cha de un nuevo proyecto, que necesitan una mayor cantidad de energía, la instalación nuclear flotante puede trasladarse al lugar en el que se esté arrancando otro proyecto”, explican los responsables de la iniciativa.

Una de las cuestiones esenciales en cualquier proyecto de producción de energía nuclear es la seguridad y los defensores de las centrales nucleares flotantes creen que este concepto será más seguro que las centrales construidas sobre tierra firme. El barco ha sido construido pensando en la posibilidad de que choque

con icebergs, algo que no sería extraño en la región ártica, para resistir al impacto de olas de siete metros o vientos de hasta 200 kilómetros por hora. En caso de que un tsunami arrastrase al barco tierra adentro y sufriese una inundación, cuenta con un sistema de refrigeración que funcionaría durante 24 horas. Además, los compartimentos de los reactores están protegidos por el doble casco del barco y los escudos especiales preparados para evitar la emisión de radiación al exterior en caso de un hipotético accidente.

Las plantas atómicas no serán las únicas centrales eléctricas que aprovechen las ventajas de construirse a bordo de barcos. La organización rusa Iceberg Central Design Bureau, que diseña todo tipo de embarcaciones y también creó el Akademik Lomonosov, anunció recientemente una oferta para construir una central eléctrica flotante alimentada por gas natural líquido. La oferta estipula que se pagarán algo más de 600.000 euros por el estudio de viabilidad, el diseño preliminar y la posibilidad de despliegue, según afirma Kommersant. Este tipo de plantas, que podrían ser más baratas que las nucleares, aunque sí emitirían gases con efecto invernadero, ya son una realidad. La compañía finlandesa Wärtsilä ha enviado una de esas plantas eléctricas a la República Dominicana.

Rusia cuenta con grandes planes de desarrollo industrial para la región del Ár-

Planta de energía nuclear rusa con base en el mar

La primera planta nuclear flotante de Rusia, la Akademik Lomonosov, se está preparando para embarcarse en su primera misión en el lejano este del Ártico

INSTALACIONES DEL PERSONAL

AKADEMIK LOMONOSOV

Unidad flotante de energía nuclear (FPU, por sus siglas en inglés), bautizada así en honor al científico ruso Mikhail Lomonosov.

SALA DE RECARGA

REACTORES

La planta de energía flotante tiene dos reactores de agua a presión –usan el agua como refrigerante y moderador de neutrones– KLT-40, que también se utilizan en los rompehielos rusos de la clase Taimyr y en el portacontenedores Sevmorput (este último, con capacidad para navegar en el Ártico).

De acuerdo con Rosatom, los dos reactores generan hasta 70 MW de potencia eléctrica o hasta 300 MW de calor, lo que es suficiente para dar servicio a una ciudad septentrional de unos 100.000 habitantes.

ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD FLOTANTE DE ENERGÍA NUCLEAR (FPU)

Longitud	144 metros
Anchura	30 metros
Desplazamiento	21.500 toneladas
Personal	69
Velocidad promedio de remolque	4 nudos

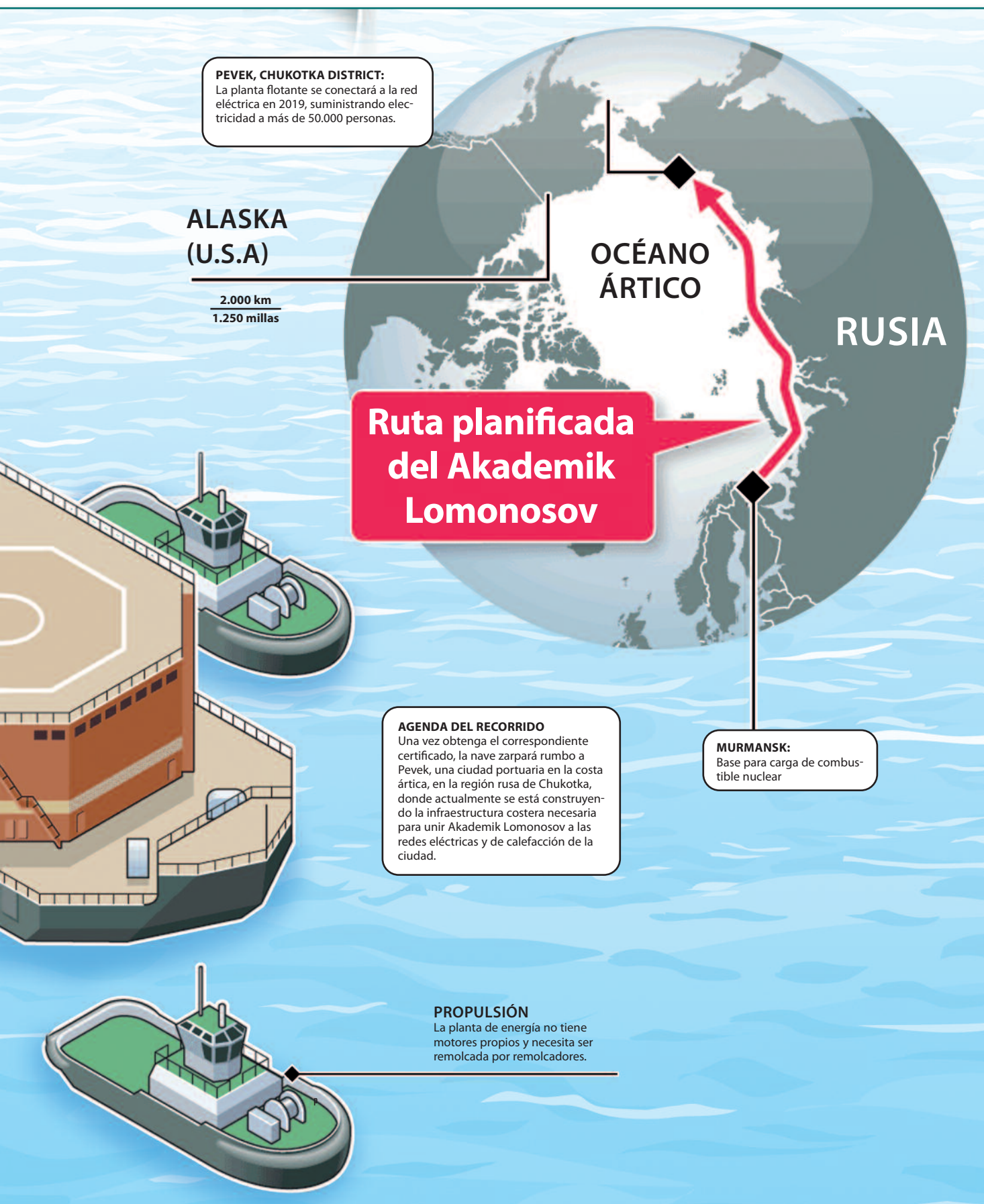
La compañía considera que la planta de energía flotante es una solución comercialmente viable para quienes consumen mucha energía en lugares como asentamientos aislados, islas o grandes plataformas petrolíferas en alta mar.

TURBINAS DE VAPOR

ENERGÍA NUCLEAR

Dos unidades de reactor KLT-40S pueden generar hasta 70 MW de energía eléctrica.

HELIPUERTO





El Akademik Lomonosov ha sido diseñado de tal manera que fuese sencillo para los operarios soportar las difíciles condiciones de trabajo del Ártico. Por eso, cuenta con instalaciones como gimnasios, bares o bibliotecas.

tico, incluida la ruta del Mar del Norte y los ríos septentrionales Obi, Yenisei y Lena. En esa región, la opción nuclear ofrecería una autonomía difícil de igualar, pero las reservas de gas natural en las aguas del norte también facilitarían el suministro a una planta eléctrica de este tipo.

Adiós a Bilibino

La historia de la llegada del Akademik Lomonosov a Pevek será también la del desmantelamiento de la central nuclear más aislada (y de menor tamaño) del mundo. La central eléctrica de Bilibino, en Chukotka, a más de 5.600 kilómetros de Moscú y con una separación de once husos horarios, cuenta con cuatro pequeños reactores y lleva en funcionamiento desde 1976. El 12 de febrero de este año, según contaba *The Maritime Executive*, la organización nuclear rusa Rosenergoatom recibió un permiso para operar el reactor número uno de la planta de Bilibino sin generar electricidad durante 15 años, un requisito del proceso regulatorio del país que se debe cumplir antes de comenzar el

desmantelamiento. El reactor fue desenchufado de la corriente el pasado marzo y su combustible fue retirado y almacenado. Está previsto que los otros tres reactores se desconecten en 2022.

Bilibino fue fundada en los años cincuenta para explotar el oro del extremo oriental del país, y la central, que sirvió para satisfacer las necesidades energéticas de la actividad minera, comenzó a ser construida por voluntarios de las juventudes comunistas, el Komsomol, en 1974. Esa industria llevó la población de la localidad hasta los 15.000 habitantes durante los ochenta, pero la caída de la Unión Soviética y el agotamiento de las reservas de oro provocó un descenso abrupto de la población, que hoy ronda los 5.000 habitantes. Para llegar a Bilibino desde Pevek, donde estará amarrado el Akademik Lomonosov, hay que transitar por una carretera construida sobre el hielo que solo se derriete cuando llega el verano.

Entre las críticas que se han planteado a esta nueva central nuclear flotante está el interés real de su llegada al extremo orien-

te ruso. Aunque ya muy disminuida, la población de Bilibino está dedicada en gran medida a mantener la central nuclear. La comparativamente reducida tripulación que necesitaría el barco sería un golpe más para los habitantes de la zona que, además, tampoco podrían consumir la cantidad de energía que producirá el Akademik Lomonosov, capaz de dar electricidad a una ciudad de 100.000 habitantes.

Algunos críticos han planteado que, en realidad, esa energía se emplearía para alimentar las actividades de perforación que están proliferando en el mar de Chukchi, una práctica que llevaría al mer-

cado nuevos hidrocarburos y pondría en duda los argumentos de Rosatom en favor del barco nuclear como una herramienta para reducir las emisiones de CO². A estas dudas sobre la conveniencia de este tipo de centrales flotantes se añade la propia lejanía del área de operación, que requeriría recorrer largas distancias para retirar el combustible gastado para su almacenamiento. A la distancia se añadirían las condiciones hostiles del Ártico que dificultaría la reacción en caso de un accidente.

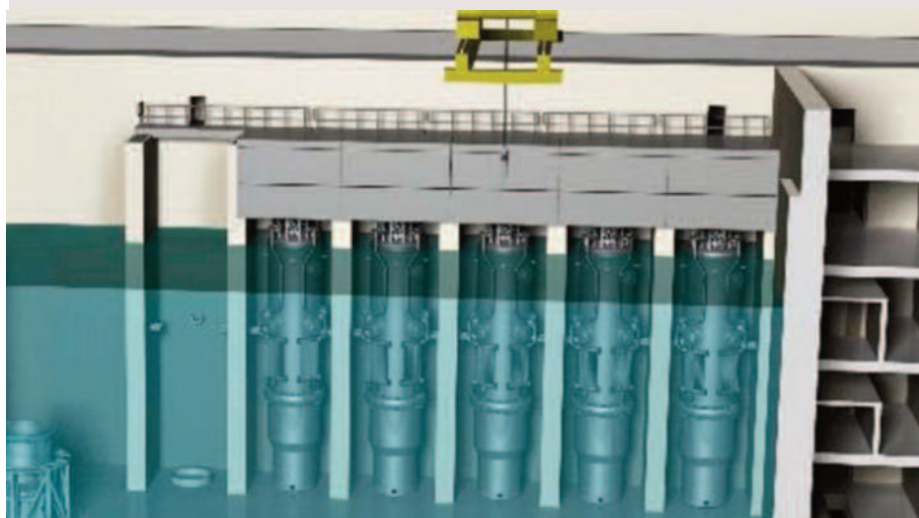
Otros proyectos

Pese a estas críticas, el interés de otras grandes potencias en este tipo de centrales nucleares flotantes no se ha reducido. El verano pasado, China comenzó a trabajar en su propio proyecto en la ciudad de Yantai, en el Este del país. Este proyecto, que tendrá un coste inferior a 200 millones de euros, debería estar finalizado y listo para producir energía en 2021. El objetivo de la potencia asiática sería, en principio, facilitar el acceso a electricidad en las islas y ciudades costeras del mar del Sur de China,

Tecnología de reactores modulares pequeños

El proyecto del Akademik Lomonosov se basa en la tecnología de Reactores Modulares Pequeños. Un rasgo característico de este tipo de diseños es que el plan del reactor está integrado, con el generador de vapor, el compensador de presión y varias unidades de equipamiento más ensambladas en una sola unidad para luego enviarse al lugar de instalación en un solo bloque. Los dos reactores son del modelo KLT-40S, el mismo que utilizan los rompehielos.

El barco también deberá estar preparado para alojar en una región de Rusia



con condiciones extremas a los 131 trabajadores que mantendrán la planta. En total, serán 342 personas las que irán rotando para satisfacer las necesidades de la instalación. El Akademik Lomonosov ha sido diseñado de tal manera que fuese más sencillo para los operarios soportar las difíciles condiciones de trabajo del Ártico. Por eso, "la embarcación cuenta con instalaciones como gimnasios, bares o bibliotecas", apuntan desde la sede de Rosatom en Moscú. Los trabajadores permanecerán en el barco durante cuatro meses antes de acceder a otros cuatro meses de descanso.

pero también para alimentar instalaciones industriales o mineras en alta mar.

La compañía responsable del proyecto, la Corporación Nuclear Nacional China (CNNC), ya tiene un diseño preliminar del reactor, bautizado como Yanlong, basado en el diseño de sus reactores experimentales tipo piscina con los que han trabajado durante las últimas cinco décadas. En 2016, la CNNC ya había anunciado que tiene previsto construir 20 centrales atómicas flotantes impulsadas dentro del

13º plan quinquenal chino 2016-2020.

Otros países se plantean aplicar la tecnología que Rusia ya ha colocado a bordo del Akademik Lomonosov. En diciembre del año pasado, durante la reunión del G20 que tuvo lugar en Buenos Aires, representantes de Rosatom firmaron con Argentina un acuerdo para ampliar su cooperación en el ámbito de la energía nuclear con usos pacíficos. En ese acuerdo, los dos países plantean la posibilidad de operar en conjunto una flota de centrales

nucleares flotantes diseñadas por Rusia.

Cuando el Akademik Lomonosov comience a producir electricidad en el Ártico, el Sturgis, que de algún modo fue la primera central nuclear flotante, ya habrá sido desmantelado. Eso sucedió en septiembre del año pasado: más de 40 años después de dejar de funcionar, su reactor se desactivó y más de 680 toneladas de residuos nucleares se retiraron. Durante los ocho años de funcionamiento, utilizó sus 10 megavatios de potencia para dar energía a los 80 kilómetros de esclusas del canal de Panamá.

Pero este barco no fue diseñado para convertirse en una central flotante. Entre 1945 y 1963 fue utilizado como barco de carga y conocido como SS Charles Cugle. Después, fue partido en dos y dotado con un reactor nuclear y una turbina para generar electricidad. Cuando ganó su capacidad para producir energía nuclear, el Sturgis perdió la de moverse y, como el Akademik Lomonosov, tuvo que ser remolcado. En los años 60, EE.UU planteó el barco como el primero entre muchas centrales itinerantes similares, que se desplegarían con facilidad hasta lugares difíciles de alcanzar o generar energía.

Entre los aspectos positivos de la enseñanza del Sturgis se puede destacar que funcionó sin ningún problema durante los ocho años en que fue necesario, recargando combustible en varias ocasiones. Según sus ingenieros, su trabajo permitió liberar más de tres billones de litros de agua para otros usos en la zona del Canal que antes se utilizaban en parte para alimentar una central hidroeléctrica poco eficiente.

Una interpretación negativa de la experiencia del Sturgis es que, al final, fue la única central nuclear flotante construida por los EE.UU. El programa militar que impulsó su desarrollo se canceló en 1977 y se decidió que este tipo de proyectos eran demasiado caros. El tiempo dirá si el nuevo impulso ruso a la energía nuclear flotante tiene o no futuro.

La extensa e internacional carrera científica del físico Carlos Alejaldre (Zaragoza, 1952) está íntimamente ligada a la investigación en fusión nuclear y al Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales. En esta institución, allá por los años ochenta, lideró el desarrollo, la construcción y explotación científica de un reactor experimental de fusión, el TJII, que sigue funcionando

en las instalaciones de Moncloa (Madrid), tras haber aportado durante dos décadas avances científicos reconocidos en todo el mundo. De la mano del TJII y su experiencia, Alejaldre lideró, desde el Ciemat, la candidatura para albergar en Vandellós el reactor experimental de fusión ITER, un colosal proyecto mundial que finalmente se llevó Francia y que se está construyendo en Cadarache.

Carlos Alejaldre, director del Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales (CIEMAT)

“El gran reto de las renovables es lograr el almacenamiento de energía a gran escala”

■ Alicia Rivera / Periodista Miguel G. Rodríguez / Fotografía ■

Pero la candidatura española dejó muy buen sabor de boca a los expertos internacionales por su calidad, y Alejaldre, tras un breve paso por la política científica activa como director general de Política Tecnológica (2004-2006), pasó a ser director general adjunto de Seguridad Nuclear en ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Desempeñó el cargo durante nueve años. Luego volvió al Ciemat y ahora es el director del centro, que intenta recuperarse de los años de recortes y trabas burocráticas que ha sufrido, como el resto del sistema español de I+D.

PREGUNTA. ¿Cuáles son las fortalezas del Ciemat actualmente?

RESPUESTA. La fortaleza del Ciemat está en la capacidad que tiene de aglutinar, por ejemplo, a un centenar de investigadores –y el reactor TJII es una buena muestra– y ponerlos a trabajar en un proyecto. Esto supone un gran potencial, que no creo que tenga ninguna otra institución en España. Tenemos una estructura que nos

permite generar proyectos grandes de manera relativamente sencilla, poniendo juntos a trabajar a científicos, ingenieros y todo el personal necesario para acometer la construcción y explotación de lo que se nos ponga por delante. No es casual que tengamos en explotación dos grandes instalaciones en áreas totalmente diferentes: el TJII, en fusión, y la Plataforma Solar de Almería, en energía solar. Esto significa que estamos muy cerca de los desarrollos tecnológicos y muy cerca de las empresas. Es algo muy importante a valorar.

“Tenemos que ser competitivos en Europa, en el mundo; conseguir proyectos y no poner trabas burocráticas que nos impidan estar en esa competición”

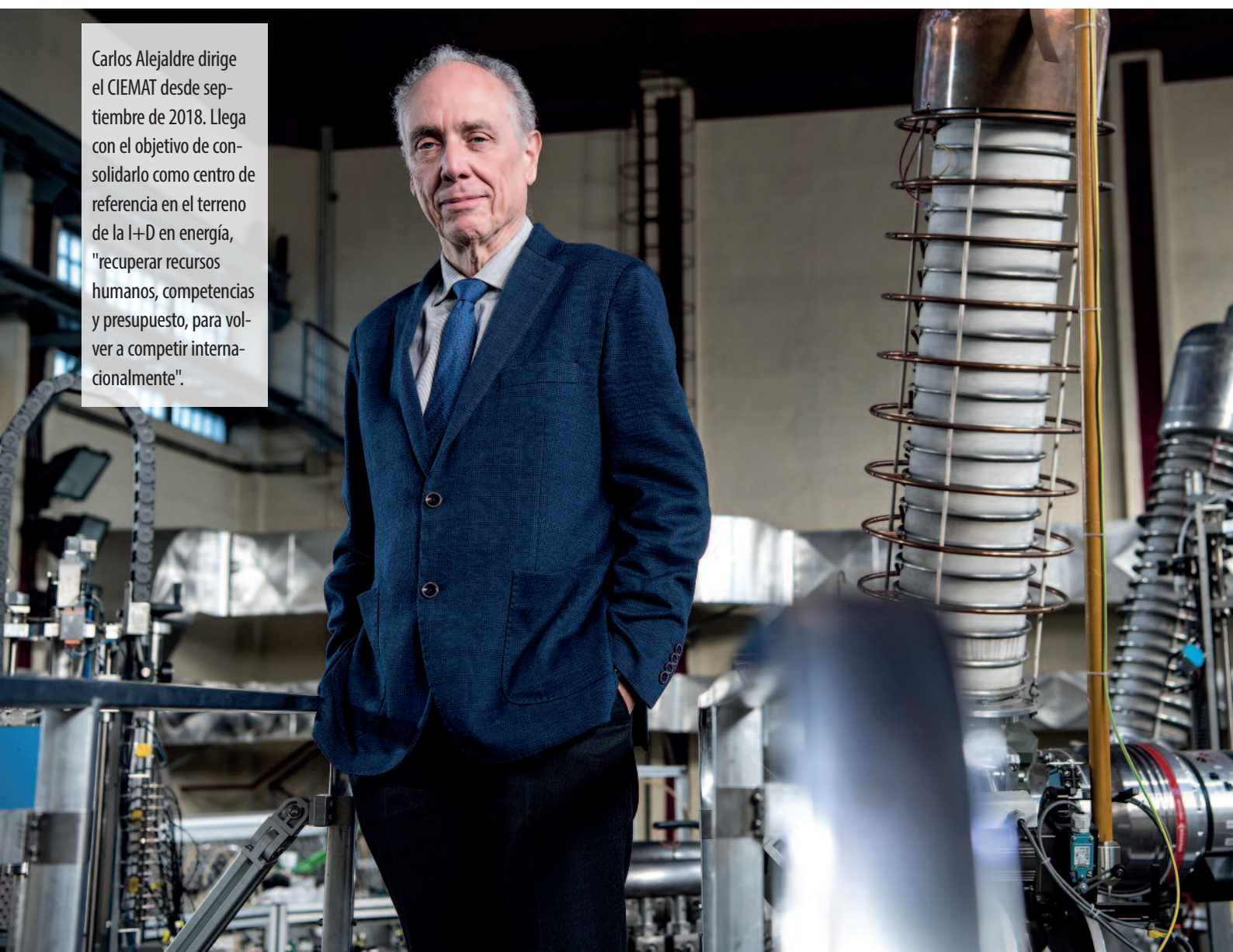
P. Usted conoce el Ciemat desde hace más de 30 años y ahora asume su dirección. ¿En qué situación lo encuentra?

R. En una situación muy difícil. Ha habido recortes importantes del presupuesto, del orden del 30%. Pero, además, el problema fundamental es que las dificultades para ejecutar el presupuesto han sido tales, que resultaba casi imposible utilizar incluso esos presupuestos recortados. Todo esto ha generado la baja moral de los investigadores, que se ven cuestionados e imposibilitados para atraer grandes proyectos, porque luego no se pueden realizar.

P. Con este panorama, su decisión de asumir la dirección del Ciemat, ¿es un efecto contagio del entusiasmo del ministro Pedro Duque y su equipo?

R. Cuando me lo encomendaron pensé en la película *Misión Imposible*... Pero sí, es un poco efecto contagio de esa ilusión de que realmente podemos cambiar algo. A eso he venido, a mejorar y cambiar y si no es posible, me iré. Me he reunido con prácticamente todos los equipos del Ciemat, he

Carlos Alejandre dirige el CIEMAT desde septiembre de 2018. Llega con el objetivo de consolidarlo como centro de referencia en el terreno de la I+D en energía, "recuperar recursos humanos, competencias y presupuesto, para volver a competir internacionalmente".



visto la calidad que tienen, la profesionalidad, el buen hacer, los contactos internacionales, la ilusión por que esto mejore. La gente está deseando que pongamos los medios para poder realizar su trabajo.

P. ¿Cuáles son sus planes?

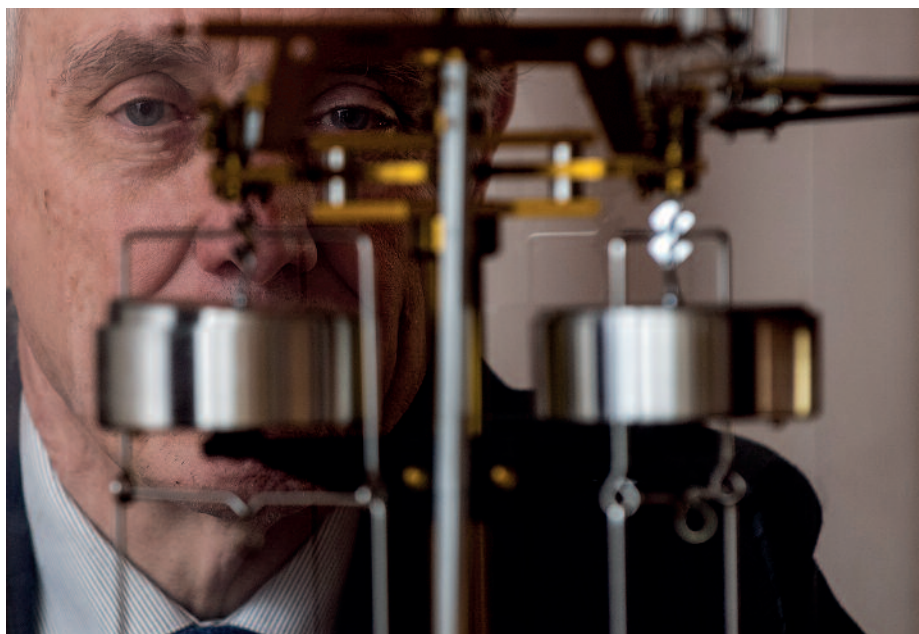
R. Lo importante es recuperar esa ilusión y la capacidad de generar grandes proyectos en el Ciemat; recuperar la confianza en que el sistema es capaz de ofrecer unas herramientas de trabajo y mantener los proyectos vivos. El Real Decreto de Medidas Urgentes para la Ciencia aprobado en el Consejo de Ministros es un gran paso en

esa dirección para que volvamos a ser competitivos, aunque todavía hay que recuperar más capacidades perdidas durante la crisis. No puede ser productivo un país cuando la aprobación de una cuota internacional de 250 dólares de un proyecto de investigación tiene que pasar por el Consejo de Ministros. ¡Es absolutamente increíble que para dar esas cantidades de miseria a los investigadores tenga que aprobarlo el Gobierno!

P. En la última década, además del recorte de la financiación, el Ciemat (y otros Organismos Públicos de Investigación) ha

visto mermada su eficacia por las trabas burocráticas en la gestión, como denunció en estas páginas hace unos meses su antecesor en el cargo, Ramón Gavela. ¿Cómo afronta usted este problema?

R. Como he mencionado, el Real Decreto nos va a ayudar enormemente. Volvemos al control financiero permanente y ahora podemos contratar investigadores y técnicos de manera indefinida para proyectos con financiación asegurada, por poner un par de ejemplos que hace poco eran impensables. Ahora tenemos que recuperar el presupuesto perdido durante la crisis.



“No hay ningún centro, en mi opinión, donde el desarrollo tecnológico esté tan presente y que pueda aportar tanto a la discusión energética en este país como el CIEMAT”, garantiza Alejaldre.

P. Una práctica que ha perjudicado mucho al desarrollo de los programas científicos y la labor investigadora ha sido la denominada intervención previa de Hacienda, que impedía desembolsar dinero ya aprobado sin la autorización pertinente en cada momento, retrasando o bloqueando toda actividad. Una vez suprimido ese trámite, ¿ve con más optimismo las perspectivas de funcionamiento del centro?

R. Sin duda es un gran paso para recuperar nuestra competitividad como centro de investigación. Quiero dejar claro que esto no quiere decir que no vayamos a tener control financiero: lo tenemos permanentemente y queremos que exista. Pero, no que cada uno de los pasos que tenemos que dar en los proyectos, cada euro que ya se nos ha asignado, deba ser aprobado antes de modo ‘preventivo’. Eso era demoleedor. En las gráficas se aprecia cómo coincide en el tiempo la disminución de la ejecución presupuestaria con la entrada en vigor de la intervención previa. Tenemos que ser competitivos en Europa, en el mundo; conseguir proyectos, y no podemos tener unas trabas burocráticas que nos impiden estar en esa competición.

Cuando nosotros no podemos coordinar un proyecto, pues lo hará otro grupo en Alemania, o en Francia...

P. Era un poco sorprendente esta práctica de la intervención previa del gasto en el sistema de I+D español, que no ha sufrido la lacra de la corrupción.

R. Efectivamente. Llevo en el Ciemat, de forma directa o indirecta, desde 1986 y no recuerdo que haya habido en todos estos años, con diferentes gobiernos y diferentes sistemas, ni un caso de corrupción.

P. ¿Qué presupuesto tiene el Ciemat?

R. Ahora estamos en unos 90 millones de euros procedentes del Ministerio, más 30 o 40 millones de euros al año de fondos exteriores que captamos. Pero tampoco lo podíamos gastar porque incluso ese dine-

ro que generamos estaba sometido a intervención previa de Hacienda y encima, al estar en prórroga presupuestaria, nos han limitado el gasto al 50%. Los proyectos europeos, por ejemplo, si no los realizas en plazo, tienes que devolver el dinero. Peor aún si tienes que decir a nuestros socios extranjeros: “Perdonad, pero nosotros no lo podemos hacer, hacedlo vosotros”. Esto genera desilusión y desmotivación de nuestros investigadores.

P. ¿Es suficiente ese presupuesto total de unos 120 o 130 millones de euros al año?

R. Es un presupuesto corto. Naturalmente, con más podríamos hacer mucho más; tenemos unos problemas de personal tremendos y no podemos abarcar todo lo que podríamos hacer.

P. ¿Cuántas personas trabajan ahora en el Ciemat?

R. Sumando los tres grandes centros (Madrid, Plataforma Solar de Almería y Centro de Desarrollo de Energías Renovables, en Soria), más los centros pequeños, somos 1.360 personas.

P. De las 1.500 plazas de oferta de empleo público que el Gobierno aprobó el pasado enero, 261 se asignan al Ciemat. ¿Soluciona esto el problema de personal?

R. De nuevo es un paso en la buena dirección para resolver la precariedad de nuestros investigadores, que espero se pueda complementar con un crecimiento progresivo y ordenado de nuestra plantilla, que nos permita mantener el liderazgo internacional de Ciemat en investigación.

P. El Ciemat abarca muy diversas áreas de investigación, desde biología o energía a física fundamental.

R. Sí. Y siempre con la misma mentalidad y metodología de desarrollo tecnológico y muy cerca de las empresas. El grupo de biología, por ejemplo, está trabajando en aplicaciones de la investigación sobre la anemia de Falconi, una enfermedad rara, y ya está desarrollando patentes y tratamientos con empresas. La misma metodología se aplica aquí en energía o en fusión.

“El 80 por ciento de las empresas que trabajan en energía solar en España han pasado por el Ciemat”

España quiere la gran instalación de ensayo de materiales para la fusión

■ Texto A. Rivera | Periodista ■

“Los materiales que se precisan para los reactores de fusión nuclear existen, pero hay que validarlos”, explica Carlos Alejaldre. Y eso es precisamente lo que se hará en el IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility, por sus siglas en inglés) que España quiere alojar en Granada. “Aunque ITER tenga un éxito grandioso, solo con el conocimiento que se adquiera con él no se puede construir el paso siguiente: DEMO [el reactor demostrador de la viabilidad de la fusión como fuente de energía y paso previo a los futuros reactores comerciales], porque hacen falta los materiales de primera pared del reactor, los materiales estructurales que deben tener unas características precisas para que no se activen con el flujo neutrónico tan importante que habrá en el reactor de fusión”, continúa el director del Ciemat. En esta gran instalación se ha volcado Alejaldre en los últimos cuatro años. “Ya hemos logrado que la Unión Europea lo declare proyecto estratégico”, destaca.

“Es un proyecto de unos 600 millones de euros, absolutamente necesario para que la fusión se desarrolle y cuenta con un apartado en el presupuesto de la UE para los próximos siete años”, explica. “De momento, la UE nos da la financiación para hacer el proyecto durante dos años y nuestro plan es empezar su construcción en 2020; se haría con un consorcio específico liderado por el Ciemat”.

ITER avanzará sin los conocimientos y ensayos que aportaría el IFMIF porque, al ser una máquina experimental, trabajará en tiempos cortos con períodos de parada del reactor para analizar los datos, explica Alejaldre. Sin embargo, DEMO y los siguientes reactores, ya de producción energética estandarizada, “tienen que fun-

cionar 24 horas, constantemente, y se precisan unos materiales de primera pared que resistan el flujo neutrónico generado, que no se activen y que estén validados experimentalmente.

“Se trata, fundamentalmente, de construir un acelerador, una fuente de neutrones, de 14 MeV (megaelectronvoltios) y alta intensidad, que no existe por ahora en el mundo”, explica Alejaldre. Los neutrones incidirán sobre los materiales en estudio.

La documentación del proyecto puntualiza que “en la actualidad no existe ninguna instalación para ensayos de irradiación que pueda simular de manera adecuada las condiciones del interior de un reactor de fusión. Por

ello, el proyecto IFMIF se considera indispensable para el desarrollo de la fusión por confinamiento magnético. Su misión principal será la de generar una base de datos de materiales irradiados que sirva para el diseño, la construcción, la obtención de la licencia y la operación segura del futuro reactor DEMO. Esto solo puede obtenerse mediante el ensayo y la cualificación de los materiales candidatos bajo una irradiación neutrónica

que simule su comportamiento en el DEMO durante su tiempo de vida total”.

Aún está por decidir qué país alojará el IFMIF, pero Alejaldre está convencido de que España “tiene una buena oportunidad de traerlo a Granada”. Eso sí, en competición con Japón, que es el otro socio en el proyecto y también con aspiración de llevarse el futuro reactor. “Japón alojará el prototipo, en el que el Ciemat está muy involucrado. Tendremos que debatir, todavía no está decidido donde se ubicará el IFMIF”, concluye. ▀



IFMIF-DONES es una instalación de investigación y desarrollo de materiales necesaria para la construcción de los futuros reactores de fusión.

Prácticamente el 80% de las empresas que trabajan en solar en España han pasado por el Ciemat.

P. ¿Y en fusión?

R. Son interesantes los datos del TJII. Un grupo del Ciemat propuso, en los años ochenta, construir una máquina de investigación en fusión y, aún con la oposición de algunos líderes políticos, que defendían que era mejor enviar a nuestros científicos a instalaciones fuera de España, al final se decidió hacer aquí el TJII. Su coste fue de unos 30 millones de euros –que ahora serían unos 100 millones–, de los que el 45 % vino de fondos europeos. El 60% del total revirtió en contratos con la industria española. Pero, además, gracias a esa experiencia, esas empresas empezaron a sacar muchos contratos en Europa. Y se valoró muy positivamente la candidatura española para ubicar el reactor de ITER en Vandellós (Tarragona); no se logró, pero, como consecuencia, se eligió Barcelona para alojar el centro europeo de ITER, y unos 800 millones de euros han revertido en contratos para empresas españolas en la construcción de ese reactor internacional.

P. Parece que la transferencia de tecnología, que resulta tan difícil para tantos en España, no es problema para el Ciemat.

R. El TJII es un magnífico ejemplo, otro es el trabajo en CERN y en sus aceleradores y detectores. La transferencia tecnológica no es una cuestión sencilla, pero en el Ciemat se realiza de manera muy importante en fusión, en eólica, en biomasa. Es lo que menos me quita el sueño.

P. Y también se hace aquí investigación básica.

R. Sí, abordamos desde ciencia básica, hasta lo más aplicado, y damos servicios a las empresas. La investigación es una inversión, en personal y en conocimiento, y eso hay que valorarlo.

P. Los objetivos del Ministerio de Transición Energética están estrechamente relacionados con los objetivos del Ciemat: energía, medioambiente... ¿Se va a notar

“España es el tercer país en el ITER por el valor de los contratos que están obteniendo las empresas europeas; un buen ejemplo de cómo se puede ser competitivo en Europa invirtiendo en I+D”

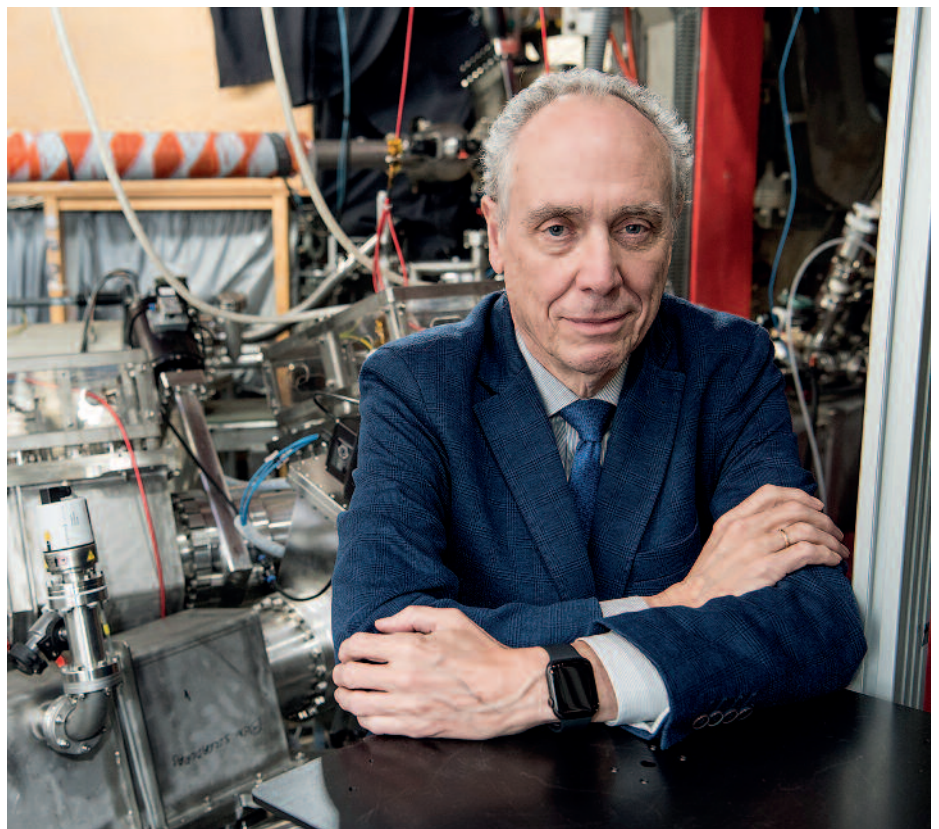
en las líneas de actuación de este centro?

R. Hemos mantenido ya reuniones con el Ministerio de Transición Energética para conocer qué necesidades tienen y ver qué podemos aportar. Pretendo realizar un plan estratégico del Ciemat hacia 2025 o 2027 que precisamente se alinee con esa nueva situación. No es que el Gobierno español quiera hacer una transición energética,

es que hay que hacerla en el mundo, sí o sí. Y en España, quien puede ofrecer las herramientas tecnológicas para esa transición es el Ciemat.

P. ¿En qué áreas concretas van a trabajar?

R. Una de las áreas en las que más hay que hincar los codos es en almacenamiento de energía. El gran reto de todas las renovables es conseguir métodos de almacenamiento que las hagan viables 24 horas, a gran escala. Si no se consigue eso, las renovables no van a llegar más allá de un 30% del consumo. Hace poco, para una charla, recuperé una transparencia de hace años en la que indicaba que el 85% de toda la energía que se consumía en el mundo era de origen fósil; al poner al día los datos pensé que habría habido un cambio importante en ese dato, y, efectivamente, lo hay: primero, se ha multiplicado por dos el consumo energético, y en lugar de un 85% de origen fósil, ahora estamos en el 86%. El consumo de combustibles fósiles aumenta



“La transición energética es una necesidad y yo veo al CIEMAT como el elemento clave en conseguir esta transición energética”, manifiesta con firmeza su director.

porque no estamos dando una buena respuesta a nivel mundial al problema energético; la cuestión del almacenamiento de energía limita mucho la utilización de las renovables a gran escala.

P. ¿Tiene el Ciemat capacidad para afrontar ese reto?

R. Tenemos mucha gente trabajando en estos temas, así que podemos aportar ideas y liderar proyectos. El problema de la energía es que hay que abordar el ciclo completo, incluido el reciclado y manejo de residuos que se producen de una manera u otra, ya sea, nucleares o las baterías de los coches eléctricos.

P. ¿Que precisa el Ciemat para recolocarse en la primera línea internacional?

R. Quitar trabas burocráticas para que seamos capaces de ir a Europa, y a todo el mundo, con la confianza que nos da el tener capacidad tecnológica para realizar proyectos. Las trabas burocráticas afectan también a la transferencia tecnológica porque no podemos realizar convenios con las empresas.

P. ¿Ve luz al final del túnel?

R. Tras una reunión con el secretario general del Ministerio de Ciencia, Rafael Rodrigo, tengo permiso, por ejemplo, para un proyecto que le he planteado: generar una empresa de base tecnológica para la construcción de un ciclotrón de generación de isótopos radiactivos de uso en medicina. Es una tecnología en la que se ha estado trabajando con el CERN (desarrollo de cavidades y bobinas superconductoras, etcétera); se trata de transferencia a la industria.

P. Usted ha estado varios años desempeñando cargos de máxima responsabilidad en ITER. ¿Por qué dejó el proyecto internacional?

R. Primero éramos seis directores generales adjuntos y luego pasamos a ser tres, de los tres grandes departamentos del programa: ingeniería, administración y seguridad nuclear, que es la que

España y el ITER

—¿Qué aporta España al ITER?

—La aportación española es absolutamente increíble. Es el tercer país por el valor de los contratos que están obteniendo las empresas europeas. El primer país es Francia y el segundo Italia. España, el tercero, va por delante de Alemania, Reino Unido, Holanda... Es un buen ejemplo de cómo se puede ser competitivo en Europa invirtiendo en I+D en España. Las empresas españolas hacen bobinas superconductoras, participan en la cámara de vacío del reactor y todas las semanas llegan equipos españoles a Cadarache. También hay obra civil, pero en su mayoría son contratos tecnológicos. Y en la parte científica hay una buena representación española en ITER. También el Ciemat participa, por supuesto.

—¿Sigue habiendo confianza en que la fusión es la gran apuesta de futuro para la producción de energía?

—Sí. Es una alternativa aceptable desde el punto de vista medioambiental, no peligrosa y los residuos no son tan críticos como en la fisión, porque los materiales empleados tendrán unos niveles de activación de cien años como mucho. ►

yo llevaba. He estado en ITER desde 2006 hasta 2015, nueve años muy intensos, y llega un momento en que es mejor cambiar. Desde que regresé me he dedicado al proyecto IFMIF-DONES [una gran instalación internacional para la irradiación de materiales de fusión, relacionada con ITER], para traerlo a España.

P. ¿Cómo va ITER?

R. Despacio. El arranque fue mucho más complicado de lo que se esperaba y una de las razones es que pensábamos que el diseño del reactor estaba termi-

nado y no era así. Cometimos el error, al principio, de ceder a las presiones internacionales para empezar a sacar contratos hacia los diferentes socios. Si hubiéramos estado tres años más ultimando todo el diseño que era necesario hacer, habría ido todo mucho más rápido. Se seguía diseñando y a la vez se sacaban contratos, lo que generaba conflictos entre los socios y las empresas. Faltaba, sobre todo, diseñar la integración de todos los componentes del reactor y subsistemas. Por ejemplo, la modificación de un componente afectaba a otros grupos que estaban trabajando en otros países, y eso generó graves problemas y retrasos importantes. Otro problema fue que el diseño del equipo no era el adecuado, con el grupo central (de unas 500 personas) trabajando en Cadarache (Francia) con toda la responsabilidad sobre la construcción del reactor, pero sin manejar el presupuesto, que manejaban las agencias de los diferentes socios del proyecto. Ahora parece que la cosa está mejor encaminada.

P. El plan era arrancar el reactor experimental en 2020.

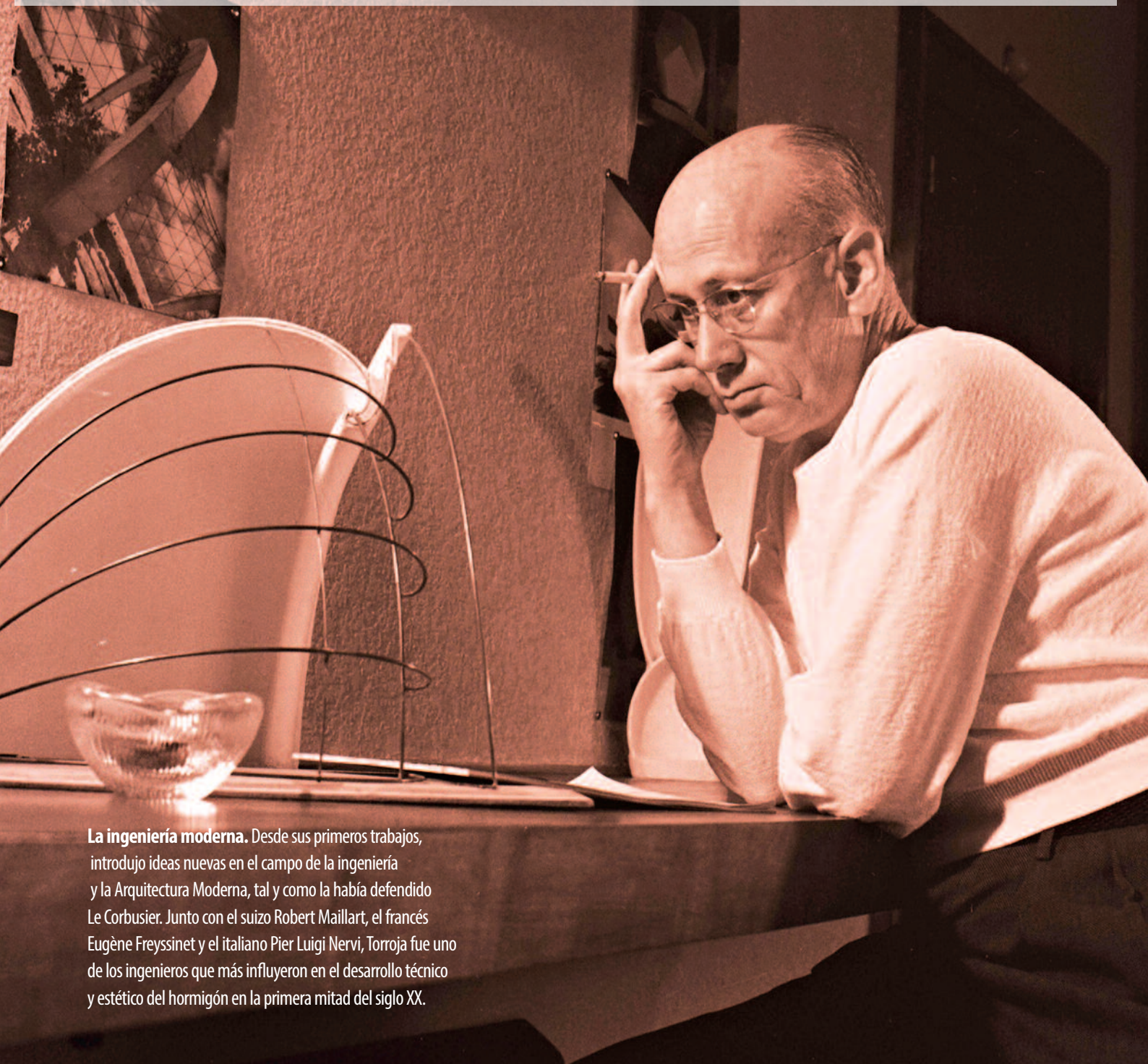
R. Inicialmente era 2016, pero enseguida pasamos a 2020 y ahora es-

tamos hablando de 2025, aunque creo que no será hasta 2027 cuando se empiece a trabajar con plasmas y muy ligeros al principio. La operación con deuterio-tritio no empezará hasta 2035-2037.

P. Los plazos del siguiente paso de ITER, que sería el reactor demostración DEMO previo a la explotación comercial de la fusión nuclear, se alargan y se estima que no entraría en funcionamiento hasta 2050. ¿Cuándo será esta una fuente de suministro energético real?

R. Calculo que, probablemente, para finales de este siglo. 

Eduardo Torroja, el genio más allá del tablero



La ingeniería moderna. Desde sus primeros trabajos, introdujo ideas nuevas en el campo de la ingeniería y la Arquitectura Moderna, tal y como la había defendido Le Corbusier. Junto con el suizo Robert Maillart, el francés Eugène Freyssinet y el italiano Pier Luigi Nervi, Torroja fue uno de los ingenieros que más influyeron en el desarrollo técnico y estético del hormigón en la primera mitad del siglo XX.

Dentro de las disciplinas científicas, es indudable que la ingeniería goza de una posición un tanto peculiar; su relación de hermanamiento con una de las Artes con mayúscula, como es la arquitectura, tiende a difuminar el concepto en la mente popular, mezclando una cosa y otra, cuando lo cierto es que muchos campos de la ingeniería no tienen ninguna relación con el diseño y la edificación de estructuras. Y, cuando sí la tienen, el esplendor de sus mejores logros cubre el ingente trabajo científico que se hizo imprescindible en su consecución. Las grandes obras de la ingeniería civil

configuran un museo al aire libre que se extiende por todos los rincones de una ciudad o un país. La ciudad de Jerez de la Frontera es conocida, no sin razón, por los tópicos de los caballos, el flamenco y los vinos. No tanto, en cambio, por albergar el acueducto de Tempul, situado en las afueras; pero a su manera constituye un referente tan atractivo como son los otros tres para el gran público, ya que esta estructura que salva el vano de 60 metros del río Guadalete, fue la primera gran obra concebida por Eduardo Torroja.

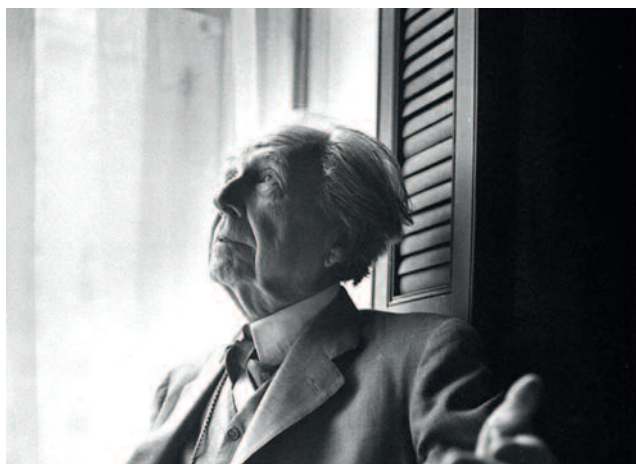
■ Texto **Vicente Fernández de Bobadilla** | Periodista ■

En palabras atribuidas a Frank Lloyd Wright, “el más grande ingeniero vivo”, y no fue la única autoridad internacional que se refiriera a él en términos similares. Hay mucha distancia en su vida entre sus primeros proyectos y

académica, estaba encorsetada por el traje y la corbata.

Para entonces, Torroja llevaba décadas superando todas las expectativas, que en su caso, dado su entorno familiar y social, se pueden considerar especialmente altas.

na web de la Fundación Eduardo Torroja señala que tanto José María como Antonio fueron, como su padre, miembros de la Real Academia de Ciencias. Esta panoplia de títulos y altas especialidades señala una concentración de vocaciones difícil de



A la izquierda, el arquitecto Frank Lloyd Wright (1867-1959), quien consideraba a Eduardo Torroja (1899-1961) —derecha— uno de los mejores ingenieros a nivel mundial.

las obras mayores que cimentarían su reputación; la misma que puede percibirse entre dos conocidas fotografías suyas, una tomada en su juventud, donde parece surgir de una niebla en sepia, mirando al fotógrafo con unos ojos frenados por la timidez y la aprensión, y otra de sus últimos años, donde aparece imponiendo una estética más creativa que científica, recurriendo al lugar común de la mirada pensativa, pero sobre todo por su atuendo, un sencillo jersey sin camisa, en unos tiempos donde la respetabilidad, también

Nació en Madrid en 1899, y la ciencia le antecedió y creció a su lado: su padre, Eduardo Torroja Caballé (1847-1928), destacó como geómetra, ostentando, entre otros cargos académicos, el de Catedrático de Geometría Descriptiva en Madrid desde 1876. Su hermano José María fue ingeniero de caminos, astrónomo y topógrafo; otro hermano, Antonio, ingeniero de minas, doctor en Matemáticas y rector de la Universidad de Barcelona; y Juan, el tercero, doctor en Ciencias Físicas y colaborador de Leonardo Torres Quevedo. La pági-

igualar, incluso en el caso de otras familias de científicos famosos.

Eduardo no tardó en reclamar su propio espacio, dentro del campo de la ingeniería civil. En 1917 se matriculó en la Escuela Especial de Madrid, donde obtendría, en 1923, la licenciatura como Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, y uno de sus profesores, José Eugenio Ribera, le contrató casi de inmediato para su empresa Hidrocivil. El primer encargo llegó al poco tiempo: sustituir el puente del acueducto de Tempul, en Jerez de la Fron-



Edificios como una de sus obras cumbre, el Hipódromo de la Zarzuela, se fraguaron en las oficinas de la empresa Investigaciones de la Construcción (ICON), fundada por Torroja y otros arquitectos e ingenieros. Su sede albergó trabajos de experimentación realizados sobre modelos en microhormigón, que permitirían estimar el rendimiento de unas estructuras laminares en unos tiempos en que no existían para ello otros métodos fiables de cálculo.



tera, arrasado por una crecida en 1917. Sorprende que su profesor y jefe confiara en un recién llegado –aunque no plenamente, pues el trabajo se realizó en colaboración con el ingeniero jerezano Francisco Ruiz Martínez–, pero la elección resultó acertada, y Torroja se metió de lleno en innovaciones como la técnica del hormigón pretensado –fue la primera obra española donde se utilizó–, patentada en 1920 por Eugène Freyssinet, por la que el hormigón es sometido a esfuerzos de compresión introduciendo en él cables o barras de acero que se tensan antes de que coja consistencia sólida. La idea inicial de construir tres vanos de 20 metros de luz, tuvo que abandonarse cuando los exámenes geotécnicos desvelaron la mala calidad del terreno, que habría hecho necesario enterrar los pilares centrales a mucha más profundidad de la prevista. La solución fue crear un único vano central de 60 metros, soportado por dos tirantes de acero hormigonado.

Nuevos caminos

Los siguientes años fueron tiempos de cambios personales y profesionales. To-

rroja hizo una pausa en una actividad creciente para casarse con Carmen Cavanillas Prosper y, en 1927, abandonó Hidrocivil para establecerse por su cuenta, fundando la empresa Eduardo Torroja, Oficina Técnica; un nombre tan falto de florituras que escondía una ambición por abrir nuevos terrenos en su especialización y por no perderse los que se abrían en otros países.

En 1928 se había celebrado en Suiza el primer Congreso Internacional de Arquitectura Moderna impulsado por Le Corbusier, donde se sentaron las bases de la

transformación de esta disciplina en un movimiento social y cultural que podría jugar un papel clave en el diseño de la sociedad. Las ideas promulgadas por los sucesivos congresos, cristalizadas en la llamada Carta de Atenas de 1930, serían absorbidas y puestas en práctica por Torroja cuando en el futuro le correspondiera liderar el Instituto de Ciencias de la Construcción y del Cemento (ITCC).

Antes que todo eso, llegaron algunos proyectos emblemáticos: en 1927, su antiguo profesor y jefe, José Eugenio Ribera, requirió su colaboración en el Gabinete Técnico que, dirigido por Modesto López Otero, construiría la Ciudad Universitaria de Madrid. Torroja participaría en el diseño de las facultades de Ciencia, Medicina y Farmacia, pero también en el de la Residencia de Estudiantes o el Hospital Clínico. Diseñó también tres viaductos para el entorno universitario: el de los Deportes, el de los Quince Ojos y el del Aire, este último quizá el más espectacular, con dos arcos gemelos de 36 metros de luz y 18 de altura; el propio Torroja escribió que aquella edificación, destinada a salvar el arroyo de

Las publicaciones de Torroja aparecían en revistas internacionales en un tiempo en que la ciencia española se destacaba por una presencia casi inexistente fuera de nuestras fronteras

Cantarranas, se iba a realizar sobre “uno de los valles más hermosos de la ciudad”, con lo que extremó su cuidado para “no perturbar la armonía del paisaje”. La mala fortuna se cebaría con los tres en distintos grados: el Viaducto del Aire acabaría enterrado cuando se prescindió del servicio de tranvías que circulaba por él; el de los Deportes fue reconvertido en vestuarios de las instalaciones deportivas de la Complutense; y del de los Quince Ojos, trece de ellos están cegados y son utilizados como almacén; los dos supervivientes siguen en activo, facilitando el paso de vehículos bajo la autovía A6.

Otras obras de esa época han disfrutado de una existencia más perdurable: la Central Térmica para la Ciudad Universitaria le valió, en 1932, el Premio Nacional de Arquitectura, recibido junto al arquitecto del proyecto, Manuel Sánchez Arcas; o el Mercado de Algeciras –hoy rebautizado con su nombre–, con su espectacular cúpula de 47,80 metros sin apoyos internos. De la importancia que este edificio tuvo para Torroja dan fe las palabras de su hijo José Antonio: “En 1933, mi padre tuvo dos hijos. Uno, el mercado de Algeciras, que en dos años lo terminó, y otro, yo mismo”. Menos suerte tuvo el Frontón Recoletos de Madrid (1935), dañado durante la Guerra Civil y reconstruido en 1940 en una maniobra casi de remiendo hasta que

fue finalmente demolido en 1973.

Todo este trabajo del día a día se combinaba con la investigación en el desarrollo de materiales. En las jornadas con motivo del trigésimo aniversario de la muerte de Torroja, el profesor Álvaro García Mesguer recordó cómo este le describió la diferencia entre ser investigador y ser otra cosa: “Pues la diferencia que hay entre el Seiscientos y el Mercedes, poco más o menos”. Edificios tan representativos como los descritos anteriormente –y una de sus obras cumbre, el Hipódromo de la Zarzuela– se fraguaron en las oficinas de la empresa Investigaciones de la Construcción (ICON), fundada por Torroja y otros arquitectos e ingenieros. Su sede albergaría trabajos de experimentación realizados sobre modelos en microhormigón, que permitirían estimar el rendimiento de unas estructuras laminares en unos tiempos en que no existían para ello otros métodos fiables de cálculo. En 1934, la empresa daría lugar al Instituto Técnico de la Construcción y la Edificación (ITCE), del que fue nombrado secretario.

Solo dos años después, las cosas cambiaron. Quizá la mayor pesadilla de un ingeniero sea ver cómo el azar de obuses y bombas puede arrasar en segundos lo que llevó años construir, cómo las ecuaciones que determinan la resistencia de una edificación concebida para durar siglos son pa-

pel mojado ante la ferocidad destructiva de las ofensivas militares; esa pesadilla sería vivida, entre 1936 y 1939, por Torroja y todos sus compañeros de profesión, que tendrían que asistir a la desaparición no sólo de edificios erigidos con orgullo en la década anterior, sino casas, barrios y, en ocasiones, pueblos enteros.

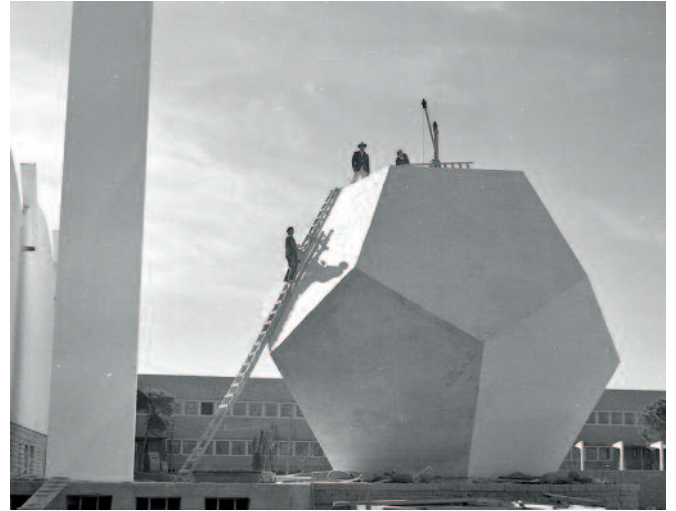
Tras la guerra

Cuando se posó la última mota de polvo, el paisaje que quedó ante los supervivientes les mostró una situación fría y precaria, con compañeros desaparecidos por la muerte o la ausencia: García Reyes se había exiliado en Colombia, y los dos arquitectos que habían creado con Torroja el Hipódromo de la Zarzuela, Carlos Arniches y Martín Domínguez Esteban, se vieron obligados, el primero al exilio en Cuba y el segundo, al exilio interior, en trabajos alimenticios por debajo de su talento.

Torroja se encontró más sólo pero, paradójicamente, más reclamado que nunca. Mientras otras vacantes eran rellenadas con cargos distinguidos más por su fidelidad a la dictadura que por la excelencia de su curriculum, él, uno de los pocos verdaderos científicos de renombre que quedaron en el país, quedó en primera fila de uno de los terrenos donde el talento era necesario de manera inmediata. Había mucho que reconstruir y, dada la escasez



Este puente sobre el Guadalquivir es muy singular, ya que solo existen dos del mismo tipo en Europa, al tener los arcos debajo del puente (Eduardo Torroja y Miret, 1951).



Las obras de Eduardo Torroja marcaron las edificaciones civiles del siglo XX y cuentan con relevancia y reconocimiento internacional.

reinante, había que hacerlo sacando de donde no había.

En 1939 ocupó la plaza de profesor de Cálculo de Estructuras de la Escuela de Caminos, y al año siguiente dirigiría el Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción adscrito a la Escuela. Sus jornadas quedaron divididas entre su estreno en la docencia, su dedicación al Laboratorio y sus nuevos proyectos. Quedó, de momento, en una relativa segunda fila su trabajo en el ITCE; pero aquella institu-

crear el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento (ITCC). Nunca hubo dudas de quién sería su director, aunque Torroja estableció dos condiciones: contar con un nuevo laboratorio más completo y amplio para el Instituto, y diseñar dicho laboratorio él mismo.

Su construcción le permitió llevar a la práctica los principios establecidos en su libro *Razón y ser de los cuerpos estructurales*: “El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fu-

sobre la mesa de diseño, el sentido práctico no pudo estar ausente de la puesta en marcha del edificio: estuvo –y todavía está– en El Bosque, en Chamartín-Costillares, una zona privilegiada siempre que se supieran salvar los fuertes desniveles del terreno. Torroja buscó adaptar la estructura a la complejidad que planteaban sus distintas áreas, y prever las necesidades que surgirían en los años siguientes. La solución fue una estructura modular que albergaba un conjunto de volúmenes, rica

en detalles que reflejan tanto la especial dedicación de su autor como su búsqueda de soluciones a un tiempo modernas y atemporales: el comedor circular, el depósito de agua, Los Siete y, como símbolo de todo el conjunto, el silo de carbón diseñado en forma de dodecaedro.

Inaugurado en 1953, y hoy rebautizado con su nombre, el laboratorio le serviría de base desde la cual dictar las normas por las que se iba a regir la inge-



Nunca se situó en ningún pedestal, y por ello pudo crecer a su alrededor un fiel equipo de profesionales que llevarían como un privilegio en años posteriores el haber trabajado a su lado

ción privada iba a conocer una metamorfosis que la convertiría en piedra angular de la nueva ingeniería civil española. En 1946, el Instituto se adhirió al Patronato Juan de la Cierva del CSIC, y en 1949 se fusionó con el Instituto del Cemento para

sión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración”. Si esta prosa transpira una calidez muy alejada de la asepsia de los cálculos

niería civil de España en la segunda mitad del siglo XX. Sus publicaciones aparecían en revistas internacionales en un tiempo en que la ciencia española se destacaba por una presencia casi inexistente fuera de nuestras fronteras. El historiador Lino

Camprubí, en su libro *Los ingenieros de Franco* (Crítica, 2017), señala que Torroja “no trabajaba ‘bajo’ el régimen ni ‘a pesar’ de él, sino que, en cierto sentido, utilizaba las estructuras estatales para sus propios proyectos”. Muy seguros tuvieron que estar, sin embargo, los integrantes del ITCC, para organizar en 1956 una cena compuesta únicamente de costillas, como homenaje al apodo del edificio, fundando en la misma la Nueva Orden del Dodecaedro Blanco en lo que Camprubí ha considerado “una parodia del simbolismo masón”, en unos tiempos en los que cualquier referencia, paródica o no, a la masonería, podía acarrear serias consecuencias.

Los discípulos de Torroja recuerdan de esos años su carácter distante, y al mismo tiempo cercano; una relativa sequedad –“nunca encontré palabras para expresar los más hondos sentimientos de mi corazón; este ha sido siempre uno de mis defectos”, escribió él mismo– atenuada por su carencia de afectación. Nunca se situó en ningún pedestal, y por ello pudo reunir a su alrededor un fiel equipo de profesionales. Continuó dejando muestras de su genio en distintos puntos de la geografía española y extranjera, pero al mismo tiempo convirtió el ITCC en un centro de investigación de primer orden para los análisis de estructuras y los nuevos conceptos de seguridad. Se establecieron líneas de colaboración con otros centros europeos, y en la revista *Informes de la Construcción*, editada por el Instituto, se presentaban los avances conseguidos fuera de nuestras fronteras, y se ilustraban sus páginas con la labor de con-

El Museo en la Obra

El Museo Eduardo Torroja está situado dentro de una de las obras de Eduardo Torroja; concretamente, bajo la tribuna norte del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid. La entrada es gratuita –salvo si se conciertan visitas guiadas–, pero sólo está abierto los días de carreras. Cuesta pensar que el público asistente encuentre un momento para abandonar los graderíos y las colas de apuestas y preocuparse por conocer algo acerca del creador del edificio; pero, quienes lo hagan disfrutarán de una visita más que completa en su brevedad, sobre su legado. Cuenta con seis salas: tres dedicadas a la vida y obra de Torroja, una para exposiciones temporales centradas en la ingeniería y la arquitectura, otra de proyecciones y otra sobre la historia del hipódromo y de las carreras.

Las salas ofrecen abundante información y testimonio gráfico sobre sus principales logros; además de los mencionados en el texto general de este artículo, están el Acueducto de Allos (Navarra, 1939), el Puente de Tordera (1939-1944), o el famoso depósito de agua de Fedala (Marruecos, 1956-57), que sigue siendo una de sus obras más reconocidas. Además de, obviamente, el propio hipódromo, comenzado en 1935 y cuya consecución fue interrumpida por la Guerra Civil en más de un sentido: Torroja se había presentado al concurso convocado en 1934 por el Gabinete Técnico de Accesos y Extrarradio, junto con los arquitectos Carlos Arniches y Martín Domínguez. El trabajo conjunto de los tres dio como resultado una estructura que arriesgaba el uso del hormigón, material relativamente nuevo, hasta lograr una forma innovadora en la estructura de sus tribunas y su espectacular cubierta, posible gracias a un sistema de apoyo central diseñado por Torroja.

Arniches y Domínguez tuvieron que padecer la indignidad de ver su nombre borrado de la historia oficial del proyecto, y sólo recientemente se ha reconocido su participación. Entristece pensar cómo habrían podido ocurrir las cosas si la guerra y lo que vino después no hubiera dispersado ese talento que había comenzado a darle la vuelta a la ingeniería y la arquitectura españolas. 

temporáneos legendarios.

Una actividad que terminó el 5 de junio de 1961, cuando Eduardo Torroja murió trabajando en su despacho. El fallecimiento llegó de sopetón, pero no era inesperado: los testimonios de quienes trabajaron con él hablan de una cierta premonición, que se traslucía en sus comentarios sobre la necesidad de concluir proyectos pendientes, de dejarlo todo listo. La evidencia más contundente llegó en la carta que dejó a sus colaboradores, encontrada tras su muerte: “El camino tiene sus altos y bajos, sus escollos que rodear, pero no importa, la marcha unida y constante en una misma dirección, con un mismo ideal, acaba por imponerse, el tiempo no importa, ciudad vuestra unión como yo la cuidé y pensad que el fruto de vuestros desvelos no es para vosotros, sino para todos, agradézcadlo o no”.

Esta carta fue leída en la Sala de Conferencias del CSIC, donde se instaló la capilla ardiente, antes de que el féretro partiera llevándose todo lo que Eduardo Torroja aún hubiera podido aportar; entre las anotaciones que dejó destacan estas palabras donde definía lo que consideró la semilla de la que germina cualquier obra sobresaliente: “Ha quedado demostrado que en España era posible crear unas organizaciones en las que existe una perfecta convivencia entre las diferentes profesiones, entre los de arriba y los de abajo, en la que todos se han acostumbrado a una vida de elevado rango humano, de caballerosidad, de respeto y ayuda mutuos, de máxima dignidad personal”. 



Las investigaciones avanzan para multiplicar la duración y fiabilidad

Baterías: el reto está en la carga rápida

Baterías con mayor capacidad y con menor peso y tiempo de carga han posibilitado la llegada del vehículo eléctrico. Pero mantienen sus mayores problemas por autonomías insuficientes, tiempos de recarga elevados o costes de producción más altos que un coche convencional. Gran parte de estos

problemas son originados por los acumuladores de electricidad, que aún no son capaces de ofrecer todas las prestaciones que necesitan para competir con los motores tradicionales de combustión.

■ Texto **Pura C Roy** | Periodista | ■

Bien por razones climáticas o por la menor producción de petróleo, que el coche eléctrico quiere competir con el de combustión es un hecho indiscutible. El mundo se prepara para una transición energética y sus retos pondrán otra vez a la tecnología frente a

nuevos desafíos. El coche eléctrico tiene que desarrollar nuevos motores, nuevas electrónicas y, por supuesto, nuevas baterías.

El futuro también será eléctrico no solo para los teléfonos móviles, tablets, ordenadores portátiles, vehículos de dis-

tintas categorías como autobuses, bicicletas o patinetes, pero también para drones que sobrevolarán las ciudades. Para todos ellos el reto inmediato de las baterías no es que duren más, que también, sino que se puedan cargar mucho más rápido y con seguridad. Cada apli-

Desde los primeros automóviles eléctricos, en poco más de una década, se ha visto una evolución notable de las baterías: desde las vetustas de plomo-ácido o níquel-hierro, hasta las actuales de iones de litio que han conseguido aumentar más de 12 veces su autonomía.



cación conlleva sus necesidades y en todas ellas entran en juego las baterías. Todo apunta a que la química de los acumuladores cambiará, aunque sería arriesgado decir cómo se producirá ese cambio en estos momentos.

Según las predicciones, las ventas de coches eléctricos superarán a los de gasolina y diésel en 2038, y su precio será similar al de los vehículos convencionales en tan solo ocho años. Desde los primeros automóviles eléctricos, en algo más de 10 años se ha visto una evolución de las baterías notable: desde las vetustas de plomo-ácido o níquel-hierro, hasta las actuales de iones de litio que han conseguido aumentar más de 12 veces su autonomía. Pero esto no es suficiente y por



Existe una carrera en el mercado para conseguir la batería que revolucionará el mundo de la movilidad eléctrica.

ello muchos laboratorios y empresas han entrado en la carrera para conseguir la batería óptima y cada cierto tiempo llega una noticia de una novedad que revolucionará el mundo de la movilidad eléctrica.



Las baterías de ion-litio son las más utilizadas en la actualidad. Una de sus mayores ventajas es su ciclo de vida ya que permiten un gran número de recargas. Su tamaño y autonomía son suficientes para los desplazamientos más habituales. Esto, junto a la fiabilidad de la tecnología, ha hecho que se conviertan en la apuesta actual, y también a medio plazo, por la casi totalidad de los fabricantes de automóviles. Según un informe de la agencia Bloomberg, el coste de las baterías de ion-litio caerá significativamente: Las baterías de ion-litio están empezando a llegar a los 300 o 400 kilómetros de autonomía. No es mucho comparado con los coches de gasoil o gasolina, pero es bastante con respecto a las primeras generaciones de motores eléctricos. La tecnología ha avanzado hasta alcanzar una durabilidad de 200.000 kilómetros, pero todavía el tiempo de recarga puede ser de horas, lo que actualmente impide a los coches eléctricos tener una eficiencia tal como para imponerse a los de combustibles convencionales.

A pesar de los avances en la tecnología de ion-litio, que prometen una larga vida a los acumuladores de este tipo, se trabaja en su evolución, ya que si bien su precio baja, su capacidad para acumular mucha energía en poco peso progresa de forma lenta.

Elon Musk y sus automóviles Tesla apuestan por la continuidad de esta tecnología. También los gigantes de la industria, como las asiáticas Panasonic, LG o Samsung. Los expertos se muestran convencidos de que el sector está destinado a crecer más y para muchos la tecnología de las baterías está en su infancia, así que se producirán novedades en el futuro, tanto en la química que permita incorporar pocos metales caros como el litio o el cobalto por otros más baratos como el hierro, el aluminio, el magnesio y el manganeso, además de ga-

Acumuladores

A parte de las baterías recargables tal como las conocemos hoy (enchufar en una toma de corriente para recargar, durante cierto número de ciclos de carga y descarga), también se están investigando otros tipos de acumuladores para vehículos eléctricos que podrían ser usados en lugar de baterías. Los condensadores son dispositivos eléctricos capaces de almacenar energía eléctrica durante la carga gracias a un campo eléctrico y devolverla después al circuito cuando cesa la carga. Su ventaja es que se pueden cargar y descargar muy rápidamente, en tan solo segundos, y tienen una vida útil realmente larga, pero el inconveniente es que la capacidad (su energía específica o densidad energética) es menor que en las baterías de iones de litio.

Los supercondensadores hoy en día ya existen, pero su energía específica, alrededor de 30 Wh/kg, no llega a ser tan alta como con las baterías. Se emplean por ejemplo en algunos autobuses eléctricos urbanos que se recargan muy rápidamente en las paradas, como por ejemplo los del proyecto de Tosa y ABB para la ciudad de Ginebra.

Intentando aunar lo mejor de ambos mundos, los supercondensadores híbridos o LIC (por ser una combinación de condensador y batería de ion-litio) se han empleado en coches de competición híbridos por fabricantes como Honda, pero su futura evolución está por definir.

Por otra parte, un grupo de investigadores de la Universidad de Florida Central han desarrollado unos supercondensadores flexibles que pueden ser recargados más de 30.000 veces sin degradarse y se cargan en segundos. "Si se reemplazaran las baterías por estos supercondensadores, se podría cargar el móvil en unos segundos y no tendrías que cargarlo de nuevo durante una semana", explicó en un comunicado Nitin Choudhary, el doctor que lideró la investigación. Aunque supone un avance, cuenta con un inconveniente principal: las dimensiones. Así, el nuevo objetivo de los responsables del proyecto es intentar reducir el tamaño de los supercondensadores para poder integrarse en aparatos de pequeño tamaño como los móviles.



rantizar su seguridad, mejorar la refrigeración y que sean ligeras y compactas.

Otro talón de Aquiles a resolver en las baterías es su proceso de degradación. Se sabe que por encima de los 60 grados centígrados su envejecimiento se acelera. Para su diseño, se tiene en cuenta los parámetros actuales que sitúan su vida útil en 15 años.

Ánodo y cátodo

La tecnología de batería de litio llegó de la mano de Sony en sus cámaras de video en 1991 y a pesar de los buenos augurios descritos anteriormente, uno de los problemas es que esta tecnología no ha evolucionado mucho en los últimos tiempos. Las baterías siguen estando compuestas por terminales, un ánodo, un cátodo y un separador empapado en un electrolito que permite pasar los iones de litio del ánodo al cátodo y viceversa, mientras evita que se produzca un cortocircuito interno en la batería. Este

Laboratorios de investigación y empresas de automoción han entrado en la carrera para conseguir la batería óptima

proceso es el que convierte la energía química en eléctrica.

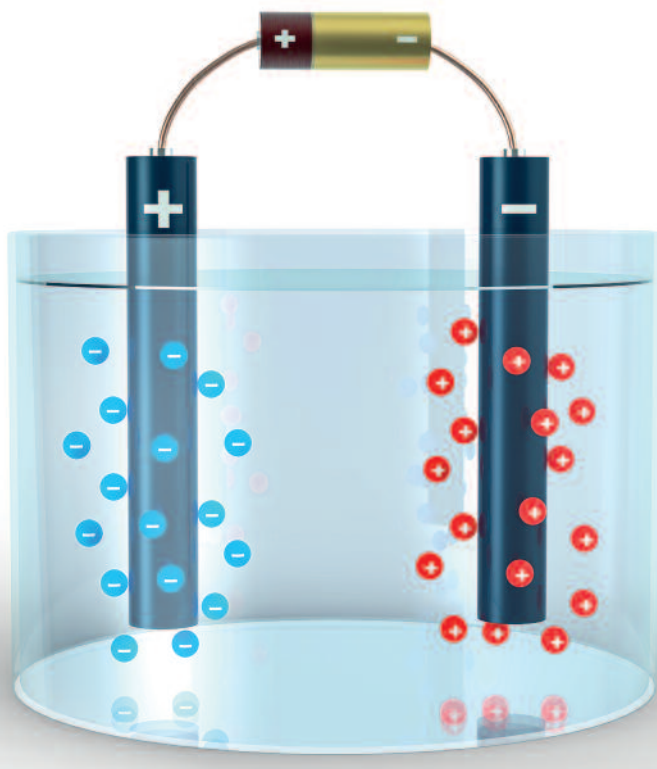
La química de celdas en una batería es la que mayor densidad energética ofrece, por ello actualmente todos los coches eléctricos que se comercializan recurren a baterías de iones de litio con electrolito líquido. Una solución líquida que se encuentra entre el cátodo (electrodo negativo) y el ánodo (electrodo positivo) es el que permite la transferencia de electrones. Esto es así porque el litio es el material más liviano que existe. Podría ser el hidrógeno, pero trabajar con él a

bajas temperaturas es muy complicado.

Dentro de las baterías de ion-litio hay a su vez diferentes subtipos, con pequeñas diferencias químicas, al emplear diferentes elementos en el cátodo y el ánodo, o diferentes proporciones entre estos, por ejemplo las baterías de litio-hierro-fosfato son las más económicas, aunque tienen también menos capacidad por unidad de volumen y masa.

Otro salto importante para aumentar las autonomías homologadas por el llamado ciclo europeo NEDC de 150 a 200 kilómetros, hasta los actuales 400 a 500 km, se ha producido gracias al empleo de nuevas celdas de batería de iones de litio con níquel y cobalto. Recuérdese que el cobalto no está exento de problemas y de contaminación sobre todo en las zonas mineras del mundo donde se extrae. El Renault ZOE con 403 km de autonomía y el Opel Ampera-e de 520 km. así como Chevrolet, Volkswagen y otros fabricantes llevan baterías con celdas de litio-níquel-manganeso-cobalto fabricadas por LG Chem. Normalmente se emplean ánodos de grafito, o grafito y silicio, y cátodos de litio, níquel, cobalto y aluminio, que Panasonic suministra a Tesla; o de litio, níquel, manganeso y cobalto de LG Chem. Estas últimas aportan además la ventaja de una mayor vida útil, casi el doble, que las batería de iones de litio “antiguas”, mientras que mantienen o mejoran ligeramente la velocidad de recarga y apenas aumentan, un 10%, el peso de la batería. Eso sí, son algo más caras.

En España hay investigaciones centradas en el magnesio (Mg), que es un metal relativamente abundante (3.000 veces más que el litio), reciclable y accesible. Las baterías con ánodos de magnesio presentan la potencialidad de una densidad de energía volumétrica muy superior a las baterías de ion-litio (por encima de 1.000 Wh/l) y constituyen una clara apuesta de futuro en el sector



Las baterías se componen por un ánodo, un cátodo y un separador empapado en un electrolito que permite pasar los iones de litio del ánodo al cátodo y viceversa, mientras evita cortocircuitos internos en la batería.

Móviles y el reto de la autonomía

En un mundo permanentemente conectado, las baterías se han convertido en la gran obsesión de las tecnológicas. Al ion-litio “clásico” le quedan años hasta que sea sustituido de forma relativamente masiva en teléfonos móviles, tablets, portátiles o vehículos eléctricos como bicicletas. Ahora el futuro cercano de las baterías no es que duren más, sino que se puedan cargar mucho más rápido. El objetivo: conseguir horas de uso con pocos minutos de carga. Después de sufrir una gran pesadilla con sus baterías, Samsung puso de manifiesto que reducir cada vez más el tamaño de las baterías y al mismo tiempo dotarlas de más capacidad entraña grandes riesgos.

Qualcomm, la empresa que fabrica los componentes inteligentes de un gran número de dispositivos apuesta por esta idea. Su sistema de carga Quick Charge 4.0, es en teoría un 20% más rápida y un 30% más eficiente, por lo que consigue cargar en 15 minutos la mitad de una batería de 2,750mAh (miliamperios hora), la capacidad de un móvil normal. Por su parte, Samsung y Huawei cuentan con sus Fast Charge y Supercharge, respectivamente, con el mismo propósito.

Y es que cargar el móvil rápidamente es muy fácil, lo difícil es que esta carga no caliente en exceso el terminal o dañe la batería. Y aquí es donde entra en juego la última patente de Huawei. El fabricante chino ha mostrado su nueva tecnología en baterías. En concreto una batería de litio-silicio, con importantes mejoras teóricas a la hora de aguantar más energía. Estas baterías li-si serán utilizadas en los futuros móviles de Huawei.

Un equipo de científicos de la Universidad Tecnológi-

ca de Nanyang (NTU, por sus siglas en inglés), en Singapur, ha logrado crear una batería que no sería el litio, sino de titanio su componente principal. Se trata, según los investigadores, de una batería ultrarrápida que recarga el 70% de su capacidad en solo dos minutos y contaría con una vida útil estimada de 20 años; es decir, diez veces más que las actuales. “Las baterías de iones de litio recargables para móviles, tabletas o coches eléctricos, por lo general, soportan alrededor de 500 ciclos de recarga. Esto es equivalente a dos o tres años de uso típico.

En esta batería de nueva generación, el grafito tradicional de las baterías de iones de litio se sustituye con un nuevo material, un gel de dióxido de titanio. “El dióxido de titanio es un material abundante, barato y seguro. Es comúnmente usado como un aditivo alimentario o en cremas de protección solar para protegernos de los rayos ultravioletas”, explicaban en un comunicado los responsables de la Universidad de NTU.



del almacenamiento energético para todo tipo de aplicaciones. Para Óscar Miguel, director de CIDETEC *Energy Storage*, “las baterías de Mg, desde hace algunos años, han estado limitadas por la ausencia de un electrolito adecuado que permita una ciclabilidad acorde con las prestaciones requeridas. Otros retos tienen que ver con la identificación de los materiales catódicos más apropiados, así como con la utilización de aleaciones de Mg con otros metales en el ánodo”.

Por otra parte, es bien conocida la de-

pendencia de Europa con respecto a otras regiones, en particular Asia. Por ello, el consorcio eMAGIC, coordinado por CIDETEC *Energy Storage*, reúne esfuerzos para investigar baterías de Magnesio. eMAGIC agrupa a diez socios de seis países (Alemania, Dinamarca, España, Francia, Israel y Reino Unido), para cubrir una completa cadena de valor que va desde la investigación fundamental hasta el análisis de viabilidad industrial, pasando por el desarrollo tecnológico, prototipado, modelado entre otros as-

pectos. “El objetivo último del proyecto es doble: por un lado, desarrollar la tecnología de baterías de magnesio hasta probar su viabilidad industrial; por otro, proporcionar a Europa la independencia tecnológica y el liderazgo internacional en el ámbito de una tecnología futura para las baterías”, explica Miguel.

Cuestión de química

La investigación en baterías no para, pero es difícil saber cuáles se comercializarán y cuáles no. En fase de laboratorio se

Y en las centrales nucleares, ¿qué baterías se usan?

En las centrales nucleares, factores como el hecho de que sean ligeras, compactas, su tiempo de recarga, o incluso la posibilidad de incorporar componentes más baratos para optimizar sus coste de producción, son factores que no tienen demasiada importancia a la hora de seleccionar las baterías. Según los estudios de los análisis probabilistas de seguridad de las centrales, el fallo de los equipos de corriente continua es uno de los que más influyen en el riesgo de las centrales nucleares, y las baterías son el último respaldo de estos equipos. Por ello, la característica más importante de las baterías que se utilizan en las centrales nucleares ha de ser su robustez, puesto que deben funcionar incluso después de un sismo y en las peores condiciones esperables de temperatura, humedad e incluso de radiación. Esa robustez la consiguen las baterías de diseño más tradicional.

Las baterías están normalmente en flotación, es decir, existen cargadores de baterías que las mantienen estado de máxima carga. Pero bajo condiciones anormales que pudiesen resultar en el fallo del suministro eléctrico a todas las cargas de corriente alterna y de corriente continua, las baterías serán necesarias durante un periodo de tiempo corto, para arrancar los generadores diésel de emergencia, o en caso de fallo de estos por periodos de tiempo más largos.

Fukushima puso de relieve que las baterías tienen un papel destacado en la seguridad y desde entonces se han tomado varias medidas para mejorar su capacidad y disponibilidad para suministrar energía. Cabe destacar que la NEA creó un grupo para establecer medidas contra la degradación acelerada y el fallo de baterías que afecten a instalaciones nucleares.

Para garantizar que las baterías mantienen su robustez en el tiempo se realizan pruebas periódicas para comprobar el estado de las mismas. Pueden dividirse en dos grupos:

- Comprobación de parámetros, que se realizan durante la operación normal de la planta.
- Pruebas de capacidad de las baterías, que se realizan con la planta parada, en las que descargan las baterías se descargan total o parcialmente, infiriéndose de los datos obtenidos durante las pruebas, el estado de envejecimiento o degradación de las mismas.



encuentran las llamadas de litio-azufre y litio-aire, cuya densidad de energía multiplica por diez a las convencionales de ion-litio, lo que permite más capacidad en el mismo peso y espacio, y podrían alargar la autonomía de los coches eléctricos hasta los 1.000 kilómetros.

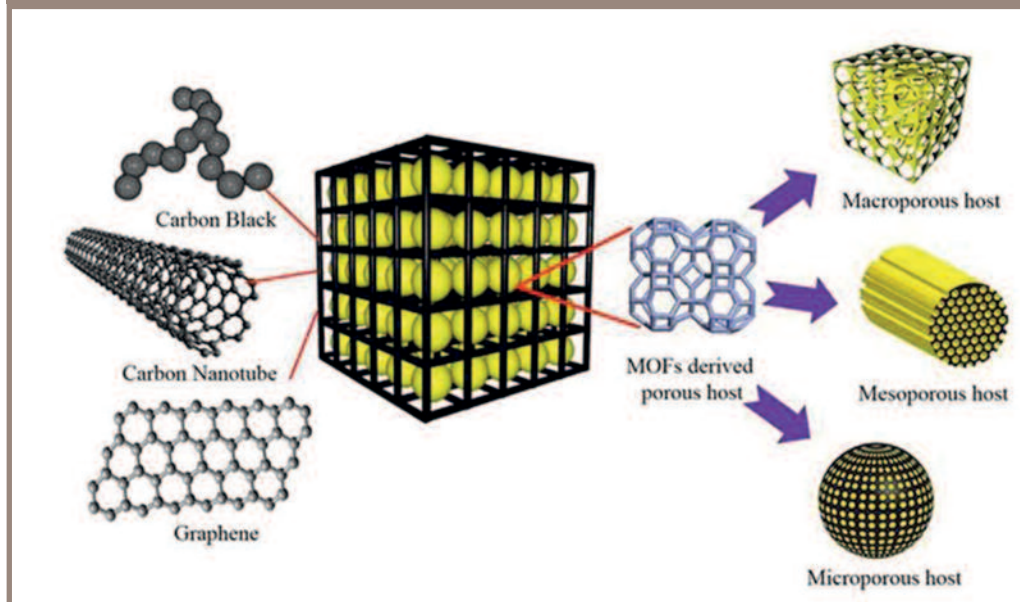
La batería de litio y azufre sigue empleando un electrolito líquido, y su energía específica podría superar los 350 Wh/kg. Un problema es que tienen que utilizar también grafeno, una estructura de carbono que todavía es complicada de producir a gran escala y bajo coste. Sin embargo, para algunos investigadores el azufre presenta las ventajas de que es más ligero que el hierro y el cobalto y es también más barato.

Otra importante evolución de las baterías de litio sería pasar de los iones de litio al litio metal, protegido contra la corrosión, que prometen triplicar la capacidad de las baterías de litio básicas. Una propuesta a tener en cuenta tal vez sea la *Licerion de Sion Power*, con baterías de hasta 700 Wh/kg de densidad energética. Sion Power lleva varios años colaborando con BASF en la investigación y, recientemente, LG Chem ha adquirido los derechos para la fabricación y comercialización de celdas y baterías a nivel industrial. Este diseño combina un ánodo de litio metálico (licerion-ion) y estará preparado para funcionar con cátodos basados en azufre y en iones de litio. En ambos casos montarán una membrana cerámica-polimérica como separador. Esta membrana es la base de este producto, ya que está diseñada para proteger el ánodo de la degradación y formación de cortocircuitos, típicas de este tipo de batería de gran densidad energética.

Nueva generación

Otra línea de investigación es la de las baterías de celdas de metal-aire. Aquí el metal puede ser diferente, litio, sodio o aluminio. Prometen la mayor energía es-

Estructura de las celdas de grafeno



pecífica de todas, por encima de 1.600 Wh/kg. Investigadas por BASF (acrónimo de Badische Anilin - und Soda-Fabrik, en español: Fábrica badense de bicarbonato de sodio y anilina), entre otros, esta celda electroquímica de metal-aire utiliza un ánodo fabricado de metal puro y un cátodo externo de aire ambiente, por lo general con una solución acuosa de electrolito. Son baterías muy eficientes, pero presentan el problema de que admiten pocos ciclos de carga; aún así, los expertos consideran que serían ideales para flotas de coches eléctricos de alquiler, donde se pudiera sustituir una batería gastada por otra nueva en lugar de tener que recargarla.

Y es que la investigación se centra también en alargar el ciclo de carga de este tipo de dispositivos para ampliar su vida útil. Es el caso de la empresa española Albufera Cells, que asegura haber logrado la durabilidad gracias a la nanotecnología. La batería de aluminio-azufre de esta compañía se desarrolla mediante un sistema con electrolito gelificado de altas prestaciones que permite que el diseño de las pilas pueda rea-

lizarse en materiales flexibles y totalmente adaptables a diversos equipos. Asimismo, su diseño, flexible, presenta, según la empresa, “grandes ventajas para varias aplicaciones muy demandadas dentro de los sectores aeroespacial, de equipos electrónicos portátiles y de automoción”.

De estado sólido

Cambiar el electrolito líquido por uno sólido es otra de las apuestas de los equipos de investigación. En estas baterías llamadas de estado sólido la clave es que en lugar de un electrolito líquido entre el

Una empresa española aplica nanotecnología para desarrollar un sistema con electrolito gelificado que permite el diseño de pilas flexibles adaptables a diversos equipos

cátodo y el ánodo, se emplee un electrolito sólido que evite la corrosión y los separadores. Para Óscar Miguel, director de CIDETEC Energy Storage, “esta tecnología seguro que tendrá un mayor recorrido en el futuro”. Según las previsiones, tanto de Samsung como de LG Chem, en 2020 se podrían aplicar a dispositivos electrónicos móviles, y sobre 2025 en vehículos eléctricos. Grandes fabricantes de coches como Toyota han anunciado que están dando pasos concretos para poderlas producir.

Las ventajas con esta nueva celda es que casi duplica la

densidad energética de una batería de iones de litio actual, no se calienta tanto, el riesgo de incendio es casi nulo, se recarga más rápido (teóricamente 6 veces más rápido) y su vida útil es mayor. Esto facilitaría su uso en coches eléctricos de tamaño medio y precio más o menos asequible con más de 650 km de autonomía real.

Una ventaja adicional en las baterías de estado sólido es que además pueden funcionar con apenas pérdidas de capacidad de carga a temperaturas ambiente muy bajas, teniendo una alta conductividad eléctrica a temperaturas de menos 20 grados centígrados. Esto solucionaría un problema de los coches eléctricos actuales, en los cuales con temperaturas muy bajas la autonomía puede disminuir hasta casi la mitad de la autonomía teórica homologada.

Sigue la búsqueda

En la búsqueda de la batería “soñada”, también han comenzado a participar científicos de numerosas universidades. Investigadores de la Universidad de Bath, en Reino Unido, y de la Universi-

dad de Illinois, en Chicago, han descubierto que al añadir iones metálicos, como el potasio, cargados positivamente, se consigue que el litio (del que están hechas la gran mayoría de las baterías actuales) se mueva más rápido. Esto provoca que las baterías se carguen muchísimo más deprisa, según acaban de publicar en la prestigiosa revista científica *Natura Communications*.

En un artículo publicado en la revista *Science* el pasado año, investigadores de la Universidad de Waterloo (Canadá) describieron los avances conseguidos en laboratorio para desarrollar un nuevo tipo de batería, la de litio-oxígeno. Los especialistas consideran atractivas las características de esta batería por el uso de un componente (el oxígeno) mucho más ligero y menos voluminoso que los utilizados hoy día. “Si se llegara a desarrollar de una forma efectiva, puede suponer un salto cuantitativo, porque con el mismo peso podrían tener el doble de energía que las baterías de ion-litio. Pero la comunidad científica advierte de que trabajar en este campo es como participar en una carrera de fondo.

Los expertos destacan que las actuales baterías utilizadas en los coches eléctricos, las de ion-litio, todavía no han alcanzado su máximo potencial. Y aseguran que en la próxima década será improbable encontrar en el mercado alternativas con mejores prestaciones. Por ahora, a falta de un paso definitivo a otro tipo de química, las empresas apuestan por la fabricación de celdas de iones de litio a gran escala. De este modo se consigue una importante reducción de precio que permitirá a los coches eléctricos competir en mejores condiciones contra los de combustión. Como ejemplo, tenemos la multimillonaria inversión hecha por Tesla y Panasonic en su gran fábrica del Estado de Nevada (EE.UU.)



La empresa española Grabat ha desarrollado una batería basada en celdas de polímero de grafeno que hacen posible baterías de alta capacidad energética.

La empresa española Grabat ha desarrollado una batería basada en celdas de polímero de grafeno que hacen posible un almacenamiento de alta capacidad energética

Cabe la posibilidad de que las baterías de iones de litio sean las elegidas para electrificar el parque automovilístico mundial. ¿Por qué buscar una química revolucionaria, si igual ya se ha encontrado la adecuada?, se preguntan los especialistas. A corto plazo, parece difícil que pueda aparecer una química nueva.

La revolución del grafeno

Nuevos nanomateriales, como el grafeno, prometen cambiar el almacenamiento de energía. Una línea novedosa en la que

trabaja el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) es en la creación de un nanofluido electroactivo. Al ser un líquido, permitiría recargar baterías desde un surtidor, como si fuera combustible convencional. Además, este nanofluido de grafeno permite una potencia mayor en menor espacio.

El grafeno, sin embargo, ya se utiliza en la fabricación de nuevas baterías y ha permitido una mayor autonomía y menor tiempo de carga. Es el caso del electrodo de grafeno, que se está empezando ya a utilizar en baterías convencionales como ion-litio y que permiten recargas en muy poco tiempo. La empresa española Grabat ha desarrollado una batería basada en celdas de polímero de grafeno que hacen posible baterías de alta capacidad energética. Sus promotores aseguran que, aplicada a los coches eléctricos, permitirían una autonomía de 800 kilómetros. Además ocupa entre un 20% y un 30% menos espacio que una batería de litio y se podría llegar a cargar en tan solo 5 minutos. 

Instalaciones de Protonterapia.

Requisitos de protección radiológica

La protonterapia será una realidad en nuestro país antes de que acabe este año, una alternativa avanzada, segura y efectiva para luchar contra el cáncer. Este sistema supone toda una revolución en el ámbito de la radiooncología y emplea, para ello, un haz de protones para "esculpir con radiación el tumor sin necesidad de dañar el tejido sano".

■ Texto **Carmen Álvarez García** | Coordinadora Técnica de Protección Radiológica Operacional | **Arturo Pérez Mulas** | Técnico del Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas | **María Luisa Ramírez Vera** | Técnico del Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas | **Dolores Aguado Molina** | Jefa de Área de Instalaciones Radiactivas Industriales | ■

A mediados del siglo XX, concretamente en 1946, Ernest O. Lawrence y M. S. Livingston postularon que los protones acelerados en el ciclotrón que habían diseñado en la Universidad de Berkeley, California, podrían ser utilizados para fines médicos. Esta conclusión constituyó el origen de la protonterapia. Sin embargo, no fue hasta casi una década después, en 1954, cuando se trató el primer paciente humano.

De forma paralela, en torno a 1955 los radiólogos de Uppsala (Suecia) se interesaron por el uso médico de protones y fueron pioneros en emplear técnicas basadas en la distribución del pico de Bragg. Siguiendo esta técnica, es posible enviar una dosis de radiación homogénea a una profundidad determinada del tejido blanco objetivo, mediante la combinación de haces monoenergéticos.

La hadronterapia, en concreto, es la rama de la radioterapia que emplea neutrones, protones e iones, en el tratamiento del cáncer. El objetivo de esta técnica es fundamentalmente maximizar la dosis de radiación sobre la zona de tratamiento y minimizarla en los órganos adyacentes evitando posibles efectos secundarios adversos sobre tejido sano. En la práctica, las partículas más comúnmente usadas son protones e iones. De estas dos moda-

lidades de hadronterapia, las instalaciones de terapia con protones son los centros más extendidos y establecidos en todo el mundo.

De esta forma, la protonterapia surge como consecuencia de, por un lado, intentar reducir la dosis de radiación en órganos sanos situados en las proximidades del volumen a tratar y, por otro

lado, de los avances técnicos en el desarrollo de equipos capaces de generar haces de protones, acelerarlos a altas energías y enviarlos hacia el paciente sin perder ninguna de las propiedades prescritas.

La terapia con protones ha ido implan-

TABLA 1

PAÍS	CENTROS EN OPERACIÓN
Alemania	6
Austria	1
Canadá	1
China	2
Corea del Sur	2
Dinamarca	1
Estados Unidos	29
Francia	3
India	1
Inglaterra	3
Italia	3
Japón	14
Polonia	1
República Checa	1
Rusia	4
Países Bajos	3
Sudáfrica	1
Suecia	1
Suiza	1
Taiwán	1
Total	79

Tabla 1. Centros de protonterapia en operación en el mundo (marzo 2019, fuente PTCOG).

TABLA 2

PAÍS	CENTROS EN CONSTRUCCIÓN	CENTROS EN PLANIFICACIÓN
Arabia Saudí	1	-
Argentina	-	1
Australia	-	1
Bélgica	1	1
Corea del Sur	1	-
China	7	4
Egipto	-	1
Emiratos Árabes Unidos	1	-
Eslovaquia	1	-
España	2	-
Estados Unidos	9	4
Francia	-	-
India	2	1
Italia	-	1
Noruega	-	2
Países Bajos	2	-
Japón	5	-
Reino Unido	4	-
Rusia	2	1
Singapur	2	1
Suiza	-	2
Tailandia	1	-
Taiwán	2	-
Total	43	20

Tabla 2. Centros de protonterapia en estado de construcción o planificación (marzo 2019, fuente PTCOG).

tándose en muchos países hasta considerarse como una alternativa ya consolidada para el tratamiento contra ciertos tipos de cáncer como se muestra en los gráficos de las tablas 1 y 2.

Según se indica en la bibliografía, en el periodo comprendido entre los años 1954-2016 se trataron a un total de 149.345 pacientes mediante radioterapia con protones. Asimismo más de 19.000 pacientes de cáncer al año reciben tratamiento de protonterapia en todo el mundo actualmente, y se estima que en el año 2030 esta cifra se incrementaría hasta los 300.000 pacientes anuales.

Las ventajas que se señalan por los usuarios de esta técnica están asociadas a la distribución de dosis en el paciente como consecuencia de la naturaleza del haz de protones; ya que, por un lado, se produce una minimización de la dosis no de-

seada en tejido sano manteniendo la dosis prescrita en el tejido objetivo y, por tanto, disminuyen los efectos adversos a largo plazo como consecuencia de la terapia con radiación. Además, destaca una mayor efectividad biológica relativa de los protones frente a los fotones.

El depósito de energía del haz de protones presenta un perfil diferente con respecto a la del haz de fotones. Como se puede ver en la figura 1, esta diferencia en el depósito de la energía se traslada a la distribución de dosis. Los protones interaccionan con el medio depositando poca energía a la entrada, posteriormente descargan la mayor parte de la energía en torno a un punto llamado pico de Bragg y, seguidamente, la energía depositada desciende de nuevo de manera abrupta. La distribución de dosis en fotones muestra un máximo mucho menos marcado a menor profundidad pero una larga cola

que deposita energía en toda la zona posterior. La manera en la que el haz de protones deposita su energía permitiría adaptar mejor la dosis a los volúmenes objetivo reduciendo la dosis al tejido sano adyacente, especialmente el ubicado en regiones más profundas que la zona a tratar y, por lo tanto, disminuyendo los potenciales efectos adversos.

La profundidad del pico de Bragg depende de la energía del haz de protones. Por ello, en la práctica, la superposición de varios haces, cada uno de distintas energías, permitirían barrer el volumen tumoral al completo.

Por último, aunque la Efectividad Biológica Relativa (RBE, por sus siglas en inglés) depende de distintos factores como la energía del haz o la transferencia lineal de energía, para el caso de la protonterapia, se toma un valor de RBE de 1.1. Esto significa que el cociente entre la dosis de

fotones requerida para producir el efecto biológico que provocaría una determinada dosis de protones y dicha dosis de protones, es de 1.1. Es decir, que para producir un determinado daño al tumor a consecuencia de esa dosis de protones, se necesita una dosis de fotones superior en un 10% para producir el mismo daño.

En términos de impacto radiológico al público y al medioambiente, las instalaciones de protonterapia generarán al final de su vida operativa una serie de volúmenes de residuos radiactivos de media y baja actividad que han de ser gestionados convenientemente. El origen de estos residuos proviene de procesos de activación de materiales estructurales de las instalaciones así como piezas concretas del equipo. Durante la operación, no existe impacto radiológico al exterior de las instalaciones y el impacto a los trabajadores es mínimo, siempre que se cumplan unas determinadas normas de protección radiológica.

Hay que tener en cuenta además, que un equipo médico puesto en el mercado o puesto en servicio en nuestro país, debe cumplir con los requisitos generales de seguridad y rendimiento que le aplican y que se encuentran establecidos en la normativa nacional y europea Directiva 93/42/EC por la que se regulan los productos sanitarios. Los dispositivos que se consideren conformes con los requisitos de estos reglamentos llevarán el marcado CE.

Tecnología

Los equipos de protonterapia, tienen como función tratar pacientes mediante un haz de protones. Un haz filiforme que se dirige a la zona del tumor y hace un barrido el mismo en capas paralelas a la superficie, variando la energía de los protones incidentes.

Desde el punto de vista tecnológico y de protección radiológica, existe una diferencia entre las dos instalaciones de protonterapia existentes en España. En uno de los casos, la aceleración de los protones

se produce en un sincrociclotrón a energía de aceleración fija de 230 MeV, la máxima requerida en los tratamientos, por lo que para obtener energías menores para tumores menos profundos es necesario un sistema de frenado y modulación de la energía mediante un degradador. En el otro equipo, se aceleraran los protones directamente a la energía deseada dentro del rango de 70 a 230 MeV mediante un sincrotrón, por lo que no hay necesidad de frenar los protones una vez acelerados.

Las dependencias principales de una instalación de protonterapia son: **La sala de Aceleración**, donde se aceleran los protones en un intervalo de energías entre 70 y 230 MeV; **La sala del Gantry**, donde se produce el guiado del haz de protones y **la sala de Tratamiento** donde se encuentra el paciente. Cada una de estas salas alberga cada uno de los componentes principales del proceso: El sistema de Aceleración, el Sistema de Transporte y el Sistema de Irradiación.

Sistema de Aceleración

Está constituido por una fuente de inyección de hidrógeno al que se le aplica un potencial. Al producirse la descarga los electrones ionizan el gas generando un plasma de iones positivos (H^+), que se di-

reccionan mediante campos magnéticos a la zona de aceleración. Esta zona de aceleración puede estar constituida por un sincrociclotrón que acelera los protones a una energía fija de 230 MeV, o por un acelerador lineal que acelera los protones hasta 3,5 MeV, unido a un sincrotrón que produce un haz de protones pulsado con energía variable entre 70 y 230 MeV.

Sistema de Transporte

A continuación el haz se transmite al el sistema de transporte compuesto por una serie de elementos de focalización, direccionamiento y caracterización del haz, cuyos componentes principales son un conjunto de dipolos para direccionamiento y cuadrupolos para transporte y focalización del haz. Así mismo, se necesita una estructura capaz de dirigir el haz al paciente desde distintas orientaciones. Estos elementos direccionadores y focalizadores (dipolos y cuadrupolos) se montan sobre un brazo denominado *gantry*, con capacidad de girar en torno al paciente hasta 220 o 360 grados en función de la tecnología. Debido a la energía de los protones inyectados, el *gantry* necesita para su giro un espacio que ocupa un volumen de unas tres plantas en la instalación.

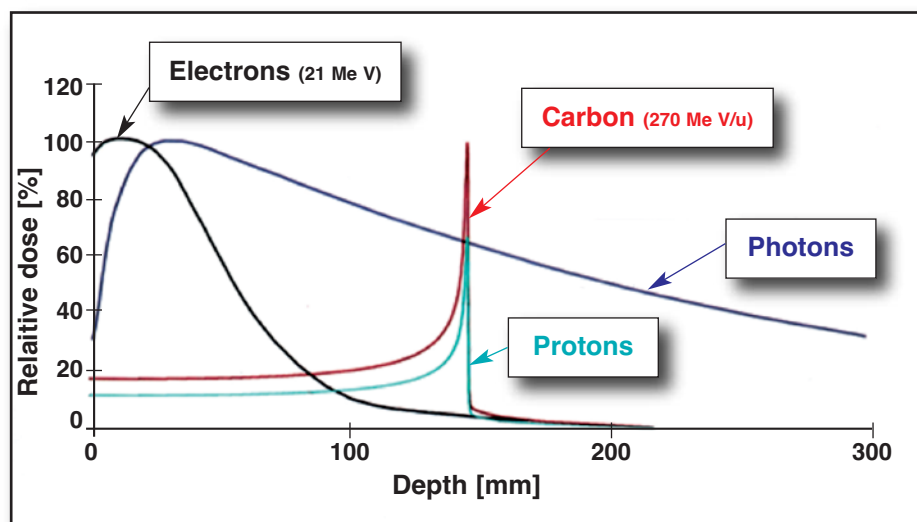


Figura 1. Distribución de dosis protones frente a la distribución de dosis fotones.

Sistema de Irradiación

Finalmente, en la sala de tratamiento se aloja el sistema de irradiación, encargado de distribuir el haz de irradiación adecuadamente en el tumor, mediante los movimientos del gantry y los elementos de posicionamiento del paciente.

En las figuras 2 y 3 se representan los sistemas que se están instalando en España: un equipo compacto con sincrociclotrón, y un equipo expandible con sincrotrón.

Operación de la Instalación

Una singularidad de este tipo de instalaciones es que en las actividades de operación diarias de la instalación, coexisten dos grupos de profesionales: el personal

de la instalación del centro hospitalario, y el personal de mantenimiento del fabricante. Este personal, se reserva las tareas de arranque y parada del equipo de protonterapia.

El flujo de operación diario se centra en garantizar que se efectúan correctamente las tareas entre los técnicos del fabricante y el personal propio de la instalación, los accesos a las salas por las que discurre el haz, la realización de los procedimientos de seguridad (o “búsqueda”) de las salas, la custodia y acceso a las llaves y la transferencia de responsabilidades e información al pasar de unos a otros.

La Tabla 3 resume secuencialmente la operación diaria cuyos aspectos fundamentales se describen a continuación:

Las instalaciones de comercialización, mantenimiento y asistencia técnica de equipos de terapia médica están regulados en España de acuerdo al art. 36 del Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RD 1836/1999).

Un equipo médico puesto en el mercado o puesto en servicio en nuestro país, debe cumplir con los requisitos generales de seguridad y rendimiento que le aplican y que se encuentran establecidos en la normativa nacional y europea Directiva 93/42/EEC por la que se regulan los productos sanitarios. Los dispositivos que se consideren conformes con los requisitos de estos reglamentos llevarán el marcado CE.

Los técnicos de la empresa fabricante son los que realizan la instalación y puesta

en funcionamiento del equipo. Después de la instalación, los técnicos de control de calidad llevan a cabo las pruebas de aceptación y confirman que el equipo de protonterapia instalado cumple las especificaciones contratadas. Cuando terminan las pruebas, el equipo se entrega al cliente (hospital) para sus pruebas y calibraciones clínicas previas al inicio de tratamientos.

Durante los periodos en que el personal está haciendo uso del equipo desde la sala de control de tratamiento, el personal de mantenimiento (fabricante) monitoriza y verifica el uso y el comportamiento del mismo desde la sala de control del acelerador, alertando al personal del hospital de cualquier anomalía que se pudiera producir.

Además de la opera-

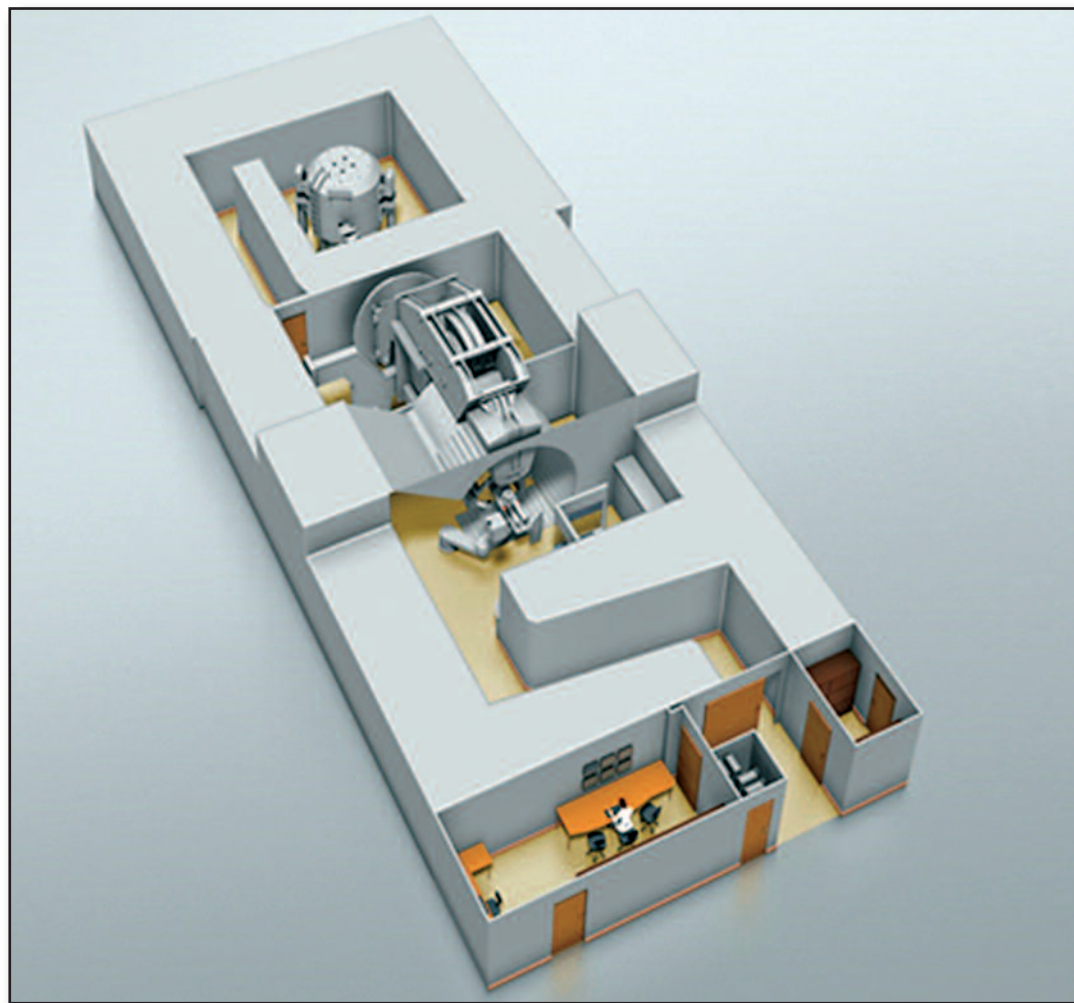


Figura 2. Equipo compacto con sincrociclotrón (Fuente: ion Beam Applications y Centro de Protonterapia Quirónsalud).

ción diaria, se establecen las funciones relativas a mantenimientos mensuales o posibles mantenimientos correctivos, que se realizan por el personal de mantenimiento durante los fines de semana o en turnos nocturnos.

Una tarea que deben realizar tanto el personal del hospital como del fabricante, en función de quién esté usando el equipo, es aplicar el procedimiento de verificación de seguridad de las salas (o “búsqueda” de las salas) para generar la señal de “*área lista para haz*” que garantice que no hay nadie en la sala recién verificada y que, por tanto, puede dispararse haz en dicha sala. El personal del hospital deberá hacer esta verificación en la sala de tratamiento mientras realiza sus tareas de controles de calidad o tratamiento de pacientes. El personal del fabricante y el del Servicio de Protección Radiológica (SPR) deberá y podrá hacer esta verificación también en el resto de las salas (sala de aceleración y sala del *gantry*) tras haber entrado en ellas para realizar sus tareas.

Por otro lado, antes de la entrega inicial del equipo por parte del fabricante al hospital, hay un periodo de montaje, emisión de haz por primera vez y calibración a

cargo de personal del fabricante, que durará varios meses e involucrará a personal de la instalación y personal extranjero que asistirá a determinadas actividades por periodos breves de tiempo.

Es imprescindible la existencia de los procedimientos adecuados de las diferentes tareas descritas en la Tabla 3, y que estén definidas las responsabilidades y funciones de los dos diferentes grupos que actúan sobre el equipo, el personal de mantenimiento y el personal de la instalación.

Riesgos asociados a la operación de la instalación

Los riesgos para el personal de la instalación y el público como consecuencia de la operación de las instalaciones derivan directamente de la interacción de los haces de protones con los materiales de los equipos y blindajes, y tienen una fuerte dependencia de la energía del haz de protones.

Las instalaciones producen protones con energías comprendidas entre 70 MeV y 230 MeV a la salida del sistema de aceleración. Los principales mecanismos de interacción de los protones de energías en

el rango indicado con la materia son de dos tipos:

- Electromagnéticos, que producen su frenado y el depósito de dosis esperada, dando forma al llamado pico de Bragg y a las características de precisión de la protonterapia, y que, por tanto, no son relevantes desde el punto de vista de la protección radiológica.

- Nucleares, que producen radiación secundaria neutrónica de alta energía (superior a 100 MeV), altamente direccional a lo largo del haz, seguido de procesos de evaporación nuclear, que genera radiación gamma, y otras partículas cargadas y neutrones de forma isotrópica, sin relación con la dirección inicial del haz. La cantidad, tipo, energía y dirección de las partículas generadas depende de la energía del protón incidente y del tipo de material con que interaccione.

En cada uno de los puntos de la trayectoria del haz de protones en que éste tiene contacto con elementos materiales se producen las interacciones mencionadas, resultando en una reducción de la corriente (número de partículas) del haz original, es

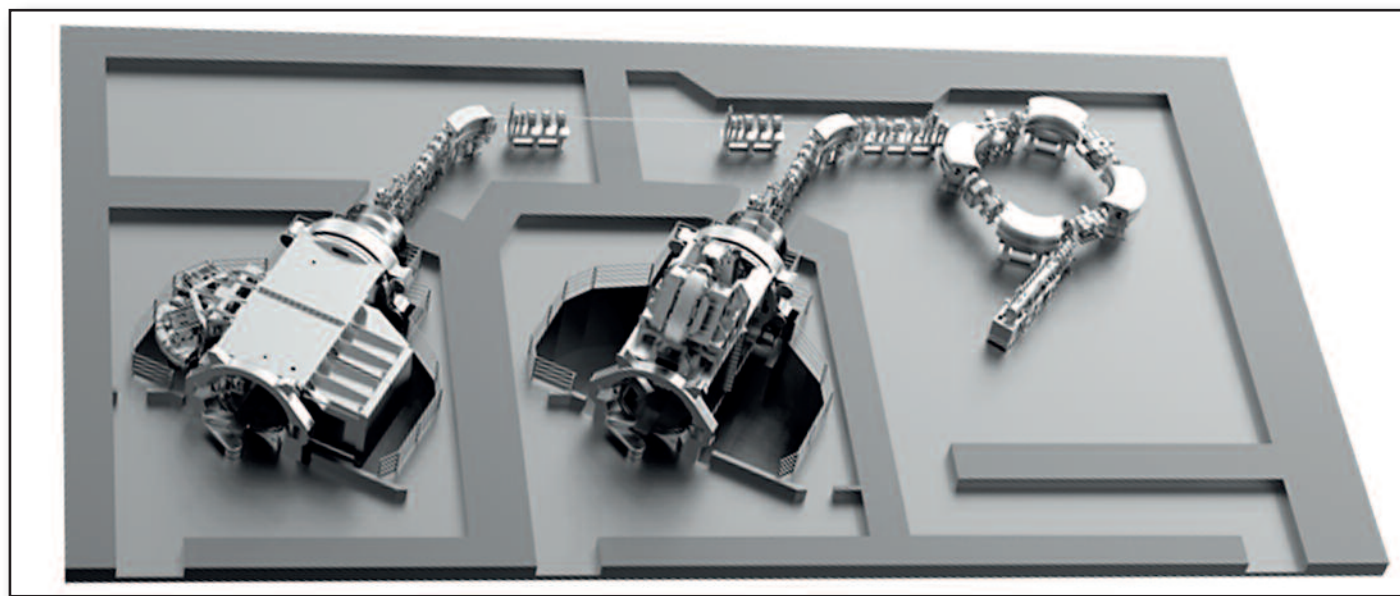


Figura 3. Equipo expandible con sincrotrón. (Fuente: Clínica Universidad de Navarra).

decir a lo que se denominan “pérdidas del haz”, y dando lugar a una fuente secundaria de radiación de las características mencionadas arriba.

El primer riesgo debido a la operación de este tipo de instalaciones es, por tanto, la exposición por irradiación externa a los campos de radiación y partículas generados en cada uno de esos puntos donde se producen “pérdidas del haz”. La radiación gamma y otras partículas cargadas son detenidas por el blindaje con mucha más eficacia que los neutrones, por lo que, la radiación empleada como criterio para el diseño del blindaje es el campo neutrónico generado.

La interacción del haz de protones y de la radiación secundaria produce también activación de materiales de los equipos, de los blindajes, del agua y del aire, en este caso esencialmente por interacción de los

neutrones térmicos. La activación tendrá lugar especialmente en los componentes metálicos del propio equipo de protonte-rapia, en el hormigón de los blindajes y en el suelo debajo de la instalación.

Por tanto, cualquier operación realiza-da en el interior de las salas por las que discurre el haz (especialmente la manipu-lación directa de componentes activados) conlleva un riesgo de irradiación externa debida a la exposición a los materiales y blindajes activados. La irradiación produ-cida por estos elementos queda apantalla-da completamente fuera de dichas salas gracias a los blindajes; sin embargo dentro será una fuente de dosis considerable a medio/largo plazo durante las tareas de mantenimiento y en la fase de clausura definitiva.

También se debe contemplar la activa-ción del aire de las salas donde se emplaza

el sistema de aceleración y en la sala del *gantry* y sala de tratamiento, así como del agua de refrigeración del equipo. En este caso el problema es a corto plazo, e inclu-ye la consideración de la posible emisión de aire activado al exterior. Otro elemento a tener en cuenta es la posible fuga del agua de refrigeración con un determina-do grado de activación.

Es importante resaltar que, dada la alta energía de los protones emitidos, las inter-acciones generadoras de radiación secun-daria (“pérdidas del haz”) y de activación se producen a lo largo de todo el camino del haz al interactuar con aquellos ele-mentos del sistema por los que pasa.

Independientemente de la operación del haz de protones, existen también dos tubos de rayos-X a considerar. Este equi-po de imagen está incluido en la sala de tratamiento, pero es operado desde fuera

TABLA 3		
Actividad	Tareas	Responsable
Asistencia técnica	Arranque diario de sistemas	Fabricante
	Control de calidad y verificaciones técnicas	
Traspaso del equipo del fabricante al personal del hospital		
Actividad clínica del hospital	Controles de calidad clínicos	Hospital
	•Colocación del paciente	Hospital
	•Uso de la imagen para posicionamiento	
	•Proceso de administración de haz	
	Controles de calidad tratamientos	Hospital
Traspaso del equipo del hospital a los técnicos del fabricante		
Asistencia técnica	Controles diario y apagado del equipo	Fabricante

Tabla 3. Tareas en la operación diaria.

del búnker principal por lo que su contribución, comparada con la radiación proveniente de los tratamientos, es despreciable dado el espesor de los blindajes. En caso de que los rayos X se operen desde dentro de dicha sala, deberá establecerse la protección necesaria para los trabajadores.

En resumen, los riesgos asociados al funcionamiento de estas instalaciones son los siguientes:

- Exposición a radiación secundaria (fotones y neutrones de un amplio rango de energías).
- Exposición a radiación proveniente de la activación de los materiales, especialmente en operaciones de mantenimiento.
- Exposición a radiación por inhalación proveniente de la activación del aire.
- Exposición debida a la activación del sistema de refrigeración.

Por último, un elemento a tener en cuenta en relación a los riesgos, aunque no es un riesgo directo, son los factores de organización, ya que, como se ha mencionado, en la instalación coexisten dos grupos de trabajo, con organizaciones posiblemente diferentes. Por tanto, es necesario garantizar que los trabajadores están bien formados y vigilados desde el punto de vista de la protección radiológica, asegurándose que las responsabilidades y procedimientos están bien definidos.

Sistemas de seguridad asociados a los equipos y a la instalación

Los equipos están diseñados con elementos de seguridad propios que limitan la posibilidad de funcionamiento anómalo. Estos elementos de seguridad tienen la función principal de proteger al paciente y al propio equipo.

Junto a estos elementos, las instalaciones disponen de otro conjunto de sistemas de seguridad que tienen la función de im-

pedir la irradiación de público o trabajadores en el interior de las salas por las que discurre el haz del sistema, dando por hecho que el blindaje impide que se superen los límites reglamentarios fuera del mismo.

Este conjunto de enclavamientos y dispositivos de seguridad incluye:

- Botones de emergencia de bloqueo de áreas.
- Botones de búsqueda de áreas.
- Llaves de seguridad y control de accesos.
- Sistema de visualización del estado de área.

Además de los sistemas asociados directamente al equipo de protonterapia, las instalaciones disponen de otros sistemas generales de seguridad: un sistema de protección contra incendios, un sistema de ventilación independiente para la zona del búnker que permite evacuar el aire posiblemente activado, un sistema de almacenamiento en caso de fuga de refrigerante, un sistema de detección y monitorización de la radiación.

Tanto las dosis directas durante la operación del haz, como la actividad generada por activación a lo largo de todos los sistemas que conforman el equipo de protonterapia, dependen de la energía del haz y del tiempo de irradiación.

La energía del haz y el tiempo de irradiación varían para cada tipo de tratamiento. Esta variabilidad es mucho mayor que en el caso de tratamientos de radioterapia con los aceleradores lineales, en los que la determinación de la carga de trabajo es más sencilla, ya que tienen solo dos, o a lo sumo tres, energías posibles, frente a un equipo de protonterapia, en que la energía puede variar de forma continua. Debido a la diversidad de tratamientos que conllevan distinta dosis impartida en el isocentro y energías diferentes en función de la profundidad en los tejidos, esta estimación de la carga de trabajo es mucho más compleja.

Activación

Como se ha indicado al enumerar los riesgos, los materiales del acelerador y los materiales de construcción de los blindajes podrán activarse como consecuencia de la interacción con los protones del haz y de la presencia de altos flujos neutrónicos. Esta activación se produce en función del tipo de partículas incidentes, de su energía y de los materiales en los que interaccionan, y tendrá lugar especialmente en los componentes metálicos del propio equipo de protonterapia y en el hormigón de los blindajes, esencialmente en su cara interior.

La permanencia en el interior del búnker, en ausencia de haz, conlleva por tanto un riesgo de irradiación externa debida a la exposición a los materiales y blindajes activados. Esta irradiación será más acusada en las manos en casos de manipulación directa de componentes activados durante las operaciones de mantenimiento. Por tanto, la irradiación externa debido a exposición a materiales activados debe ser cuantificada para los trabajadores de la instalación, no así para el público, ya que la radiación producida por estos elementos queda apantallada completamente fuera del búnker gracias a los blindajes.

Activación de componentes del equipo

Los isótopos más importantes producidos inmediatamente tras la irradiación serán: ^{61}Cu , ^{64}Cu , ^{59}Co , ^{60}Co , ^{52}Mn y ^{51}Cr ; tras dos meses se añaden ^{56}Co , ^{65}Zn y ^{54}Mn y a los 30 años dominarán el ^{60}Co y el ^{44}Ti .

Activación del hormigón

Los flujos neutrónicos secundarios generados durante la operación del equipo interaccionan con el hormigón de los blindajes del búnker, de forma que se generan isótopos radiactivos en la matriz del hormigón, cuya concentración puede irse acumulando al tratarse de algunos de vida media de varios años. Los más relevantes,

producidos en su mayoría a partir de los aditivos presentes en el hormigón por procesos de captura neutrónica de neutrones térmicos, son ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{134}Cs , ^{60}Co .

Activación del agua de Refrigeración

Los circuitos de refrigeración de los equipos que discurren por las salas de aceleración y del *gantry* son susceptibles de activación del agua. Los productos de activación esperados en el agua son ^{14}O , ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C , ^{18}F , ^7Be , y ^3H . Teniendo en cuenta los factores de autoblindaje ofrecidos por el agua, y que la tasa de dosis por estos procesos de activación será siempre comparativamente menor que la de los propios componentes metálicos del equipo, son casi despreciables.

Activación del Aire

Otra fuente de dosis, por inhalación, a los trabajadores y el público deriva de la activación del aire inducida durante la emisión del haz de radioterapia, especialmente, por los neutrones secundarios al haz de protones.

Los neutrones rápidos interaccionando con N, O y los neutrones termalizados con Ar, tras diferentes interacciones previas, pueden dar lugar a los siguientes isótopos: ^3H , ^7Be , ^{41}Ar , ^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O . Las dosis estimadas no son significativas.

La producción de estos isótopos depende tanto del flujo de protones original como del material de interacción que da lugar al flujo neutrónico secundario. Este proceso es significativo únicamente en aquellas zonas en las que se producen neutrones. La radiación neutrónica es la que determina el espesor necesario de blindaje.

Blindajes

Para la estimación de los blindajes se deben determinar dos elementos fundamentales, que serán las hipótesis empleadas en los cálculos posteriores: la naturaleza de la radiación emitida en los

puntos de “pérdida de haz”, y la carga de trabajo.

La caracterización de la radiación emitida en los puntos de “pérdida de haz” es una tarea compleja que debe considerar las distintas energías, los materiales de interacción y las corrientes de protones empleadas. Esta información es calculada por los fabricantes empleando códigos de simulación de Monte Carlo.

La carga de trabajo, en cambio, la determina el hospital. Es una función del tipo de tratamientos que se van a realizar, de su frecuencia y de los requisitos de energía y dosis que tienen estos trata-

Gracias a las propiedades físicas de los protones, la protonterapia es, en la actualidad, la técnica radioterápica más avanzada para tratar determinados tipos de cáncer debido a su eficacia igual o superior a la radioterapia convencional y sus menores efectos secundarios, eliminados en gran medida

mientos. Como se ha señalado ya, esta determinación es mucho más compleja que en las instalaciones de radioterapia con fotones, y especialmente enrevesada en aquellos sistemas que utilizan degradador, porque conllevan el efecto contra-intuitivo de que en ese elemento la existencia de tratamientos de menor energía produce mucha más radiación secundaria.

Estos dos elementos son la base del cálculo de blindajes final, que puede realizarse bien mediante simulación numérica con el método de Monte Carlo, bien mediante

aproximaciones analíticas, o también mediante una combinación de ambos.

Los blindajes finales en estas instalaciones oscilan entre espesores de 1,2 a 2 metros aproximadamente, debido a la interacción del haz de protones allí donde las pérdidas de haz son mayores.

Medidas de protección radiológica.

Conclusiones

Entre las condiciones específicas para el funcionamiento de las instalaciones de radioterapia con protones cabe destacar las que se indican más abajo. Hay que tener en cuenta que el tiempo de la fase de montaje y calibración inicial, que denominamos “periodo pre-operacional”, está en torno a 8 meses, frente a 1 o 2 meses en aceleradores lineales, por lo que existen una serie de condiciones que hacen referencia a esa fase.

• Servicio de Protección Radiológica.

Personal con Licencia

-La singularidad y complejidad de este tipo de instalaciones conlleva la necesidad de que dispongan de un Servicio de Protección Radiológica (SPR) propio, encargado del programa de protección radiológica operacional.

-A diferencia de otras instalaciones, en estas ha de haber dos supervisores de presencia física en cada turno de trabajo, uno por parte de la instalación y otro del fabricante.

• Fase pre-operacional

-Desde que comienza la fase preoperacional, las instalaciones han de contar con un responsable de protección radiológica con licencia de supervisor. Este supervisor ha de tener formación en protección radiológica específica para la instalación y equipo de protonterapia, acreditada por el fabricante o adquirida y acreditada en un centro de referencia.

Sus funciones, entre otras, son las siguientes:

-Garantizar que las actividades u operaciones del fabricante durante el montaje y las pruebas preoperacionales se realizan de conformidad con la reglamentación sobre seguridad y protección radiológica aplicable.

-Caracterizar radiológicamente la instalación durante las pruebas que se efectúen.

-Ejercer de interlocutor con el CSN para todos los temas de protección radiológica y remitir la documentación que se le requiera.

• Pruebas preoperacionales

-En esta fase se desarrollan una serie de pruebas para la puesta en funcionamiento definitiva del equipo según un calendario propuesto por el fabricante indicando el objetivo de cada prueba, su secuencia detallada, personal que participan y los criterios de aceptación junto con las medidas y los procedimientos de protección radiológica que aplican.

• Programa de Vigilancia Dosimétrica personal

-La dosimetría personal ha de cubrir, además de la radiación gamma, la radiación neutrónica y que esta sea estimada mediante dosímetros adecuados.

-Periódicamente, cuando las instalaciones estén en funcionamiento se han de enviar al CSN los resultados de la dosimetría personal incluyendo lecturas de radiación gamma y neutrónica y de los dosímetros personales, tanto de los trabajadores de la instalación como de los trabajadores del fabricante que desarrollan su labor habitualmente en la instalación.

• Caracterización radiológica y sistema de monitorización de las radiaciones

-Durante la fase pre-operacional con periodicidad mensual se envían al CSN una serie de datos que incluyen los valores registrados por el sistema de monitorización de dosis ambiental; datos registrados por los dosímetros de área; datos de uso del equipo, que permitan relacionarlo con las lecturas anteriores; datos de dosimetría personal (de neutrones (OSL) y fotones (TLD) y dosimetría operacional de lectura directa (DLD)) de todo el personal propio y externo que está trabajando en dicho periodo; posibles incidencias. Se debe remitir, además, un análisis de la información anterior y su relevancia.

-Al menos un mes antes de obtener el permiso de operación, el CSN debe disponer de la siguiente información:

-Respecto al sistema de vigilancia de dosis ambiental, la justificación de la ubicación, tarado y adecuación de los detectores y dosímetros, y tarado del enclavamiento de la puerta de la sala de aceleración.

-Resumen y análisis de los datos obtenidos durante el periodo preoperacional: niveles de radiación ambiental, niveles de activación en aire y agua, datos de dosis del personal, tanto de origen gamma como neutrónico.

• Programa de Vigilancia ambiental periódica de los niveles de radiación

-Existe un sistema de vigilancia de los niveles de activación en aire a la salida de la ventilación, así como en el sistema refrigerante del equipo y en el agua de los maniqués empleados. Dicha vigilancia se puede realizar mediante detectores portátiles que permitan asegurar que los niveles de activación no son significativos.

Conclusión

Con estas medidas, y tras la evaluación, el CSN considera que las nuevas instalaciones de radioterapia operarán con un estándar de seguridad equivalente al del resto de instalaciones radiactivas del ámbito médico en nuestro país. 

BIBLIOGRAFÍA

- [1] NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements), "NCRP Report No. 144 - Radiation protection for particle accelerator facilities," Bethesda, EEUU, 2005.
- [2] "OIEA - Technical Report Series 283 - Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators," OIEA, Viena, Austria, 1988.
- [3] Particle Therapy Co-Operative Group, "PTCOG Report 1 - Shielding Design and Radiation Safety of Charged Particle Therapy Facilities," PTCOG, 2010.
- [4] ICRP (International Commission on Radiological Protection), «ICRP Publication 127 - Radiological Protection in Ion Beam Therapy. Ann. ICRP 43(4),» 2014.
- [5] IPeM (Institute of Physics and Engineering in Medicine), «IPeM

Report 75 - Design and Shielding of Radiotherapy Treatment Facilities, 2nd Ed.,» IOP Science, 2017.

[6] European Commission, «Evaluation of the radiological and economic consequences of decommissioning particle accelerators - EUR 19151,» Luxemburgo, 1999.

[7] S. Agosteo, «RADIATION PROTECTION CONSTRAINTS FOR THE USE OF PROTON AND ION ACCELERATORS IN MEDICINE,» Radiation Protection Dosimetry, vol. 137, nº 1-2, pp. 167-186, 2009.

[8] ICRP (International Commission on Radiological Protection), «ICRP Publication 71 - Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients,» Ann. ICRP 25 (3-4), 1995.



En la imagen a la izquierda, vista aérea de la Jen en 1959.



En la imagen, el depósito de Ciemat (II), sito en el madrileño parque de la Dehesa de la Villa.

Un repaso a la historia de la investigación nuclear en España

Los precursores del átomo

Tras unos inicios voluntariosos pero errados, y una época de abandono y desinterés culminada por la Guerra Civil, España pudo recuperar los años perdidos en la carrera de la ciencia nuclear gracias a una

afortunada serie de coincidencias internacionales y al valioso papel jugado por varias figuras, a veces solo tangencialmente ligadas al mundo científico.

■ Texto **Vicente Fernández de Bobadilla** | Periodista | ■

Cuando se repasa la historia de la investigación nuclear en España, aparecen algunos nombres ineludibles; sin embargo sorprende que buena parte de ellos estuvieran más que alejados no sólo de la investigación atómica –algo lógico y compartido con otros países, ya que se estaban adentrando en un campo de la ciencia completamente nuevo– sino

incluso, en algunos casos, de la investigación en sí. Tras las tentativas más voluntaristas que efectivas emprendidas en los primeros años del siglo, la recuperación, en la posguerra del tiempo perdido en este campo estuvo en manos de altos cargos administrativos –algunos de ellos con sólida formación científica–, eficaces gestores y los entonces imprescindibles mandos

militares. Buena parte del trabajo que lo pondría todo en marcha se realizó fuera de los laboratorios.

Pero, mucho antes de que todo aquello ocurriera, España tuvo también sus precursores. En unos tiempos previos a los grandes descubrimientos que marcarían el paso de la investigación nuclear, no faltó quien percibiera las posibilidades de un

nuevo tipo de energía sobre el que los laboratorios de todos los países andaban poco menos que a trompicones. Fue la época de gloria de José Muñoz del Castillo, el precursor de la investigación atómica en España, que tras su viaje a Berlín en 1903 para asistir al V Congreso Internacional de Química Aplicada pidió y consiguió el establecimiento de un Instituto de Radiactividad, desde donde dirigiría las primeras líneas de experimentación. Solo habían pasado ocho años desde que Antoine Henri Becquerel descubrió las propiedades del uranio, seis desde que Marie Curie las bautizara como radiactividad, y ya España estaba situada en primera fila de trabajo científico. O eso, al menos, es lo que parecía.

A pesar de la generosa dotación material y de instalaciones, a pesar de su correspondencia con Marie Curie –que llegó a visitar el centro en uno de sus viajes a nuestro país–, a pesar de la publicación regular de un boletín del Instituto, la triste verdad es que Muñoz del Castillo enfocó sus trabajos a la aplicación de la radiactividad en la agricultura, campo donde llevaba años trabajando antes de su entusiasmo por las propiedades del átomo, y a la elab-



José María Otero Navascués (1958-1974).

boración de sus ‘leyes radioagrícolas’; un terreno que se demostraría yermo y, posteriormente, abandonado por todos los especialistas. La falta de consecución de sus trabajos llevó al progresivo desinterés del Instituto tras la jubilación de su creador y director, en 1920. Solo quedó como elemento aprovechable el mapa que se elab-

boró de las zonas de España con mayor índice de radiactividad, que décadas después sería una útil orientación para las primeras prospecciones de uranio.

Coincidiendo con el inicio de la decadencia del Instituto madrileño, el científico especializado en espectrografía Miguel Catalán Sañudo, que trabajaba como investigador en el *Imperial College of Science and Technology* de Londres gracias a una beca de la Junta para Ampliación de Estudios, publicó, en 1922, el artículo *Series and other regularities in the spectrum of manganese* en la revista científica ‘*Philosophical Transactions*’, editada por la Royal Society, donde describía las agrupaciones de líneas espectrales procedentes de las transiciones de electrones entre dos grupos de niveles energéticos en la corteza de un átomo de manganeso, agrupaciones que presentaban unas regularidades características. El mismo fenómeno se daba en otros átomos complejos; Catalán llamó ‘multipletes’ a estas agrupaciones, y sostuvo que su estudio permitiría una mejor comprensión de los estados energéticos de estos electrones. Aquel artículo, publicado cuando sólo contaba veintisiete años de edad, fue repetidamente citado por físicos



Arriba a la izquierda, fotografía del Acelerador Cockcroft-Walton de la JEN. A la derecha, vista aérea de la JEN en 1959.



Instituto de óptica Daza de Valdés e Instituto Alonso Barba. Sede inicial de la JEN. En la foto de la derecha, edificio del Reactor JEN-I.

principales de diversos países y constituyó una contribución básica para terminar de definir el modelo de la estructura del átomo. Dejando aparte que el término ‘multiplete’, con el que bautizó a aquellas agrupaciones, continúa siendo utilizado hoy en día, y es el único en la historia de la radiactividad creado por un científico español. Si

bien regresó a España como catedrático de Estructura Atómico-Molecular y Espectrografía, tras la Guerra Civil fue depurado e inhabilitado para ejercer sus cargos, interrumpiéndose así la carrera de un investigador cuya contribución a la ciencia, no sólo española, fue tan brillante como para que la Unión Astronómica Interna-

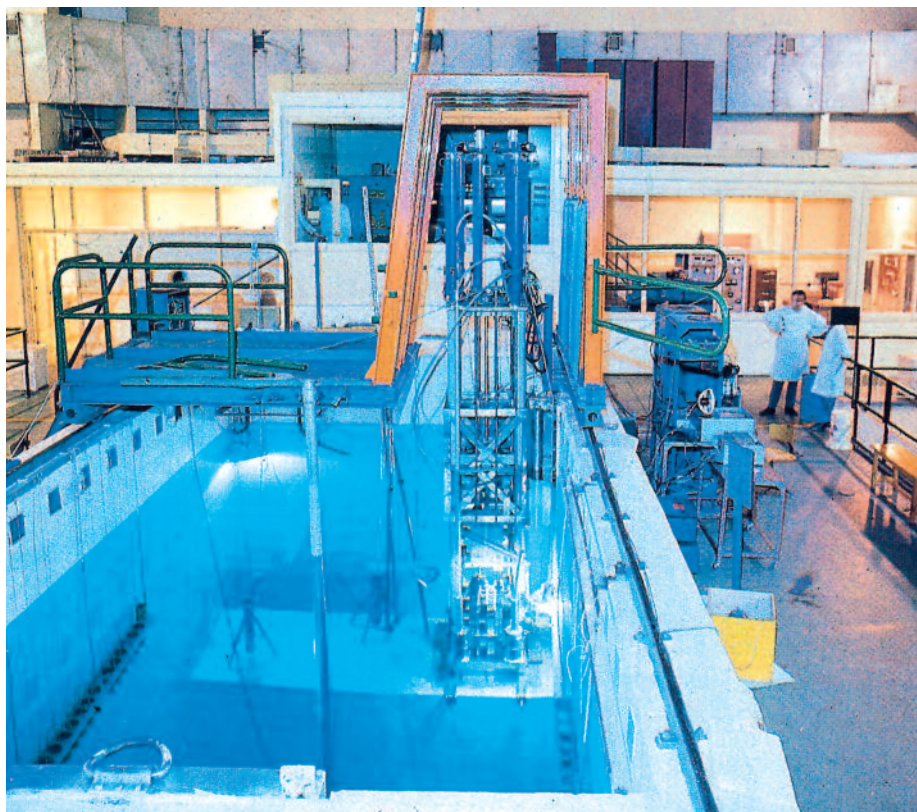
cional bautizara en su honor un cráter lunar con el nombre de Miguel G. Catalán.

Uranio e investigación nuclear

Pero, incluso antes de la llegada de la dictadura y la depuración, es incontestable que la llamada Edad de Plata de la ciencia española no abundaba en figuras como Catalán, al menos en la naciente especialidad atómica; José Manuel Sánchez Ron reconoce que “se había producido una mejora sustancial de la física española durante el primer tercio del siglo, pero la física nuclear no figuró entre los campos cultivados”.

Con los intentos aislados de iniciarse en este campo finalmente marchitos y arrinconados incluso antes de consumarse su germinación, hubo que esperar a finales de los años 40 para que una serie de circunstancias resucitara los trabajos atómicos, y ello fue posible gracias a que el subsuelo de este erial científico albergaba un tesoro de valor inapreciable para otras naciones: paradójicamente, España, uno de los países más atrasados en la investigación de la energía atómica, era uno de los más ricos en el material que estos países necesitaban para sus investigaciones.

Hubo algunos chispazos de anticipación antes de que la situación cogiera velocidad de crucero en 1948; las noticias



En la imagen superior, el interior del Reactor JEN-II.

El cerebro del reactor

El primer ordenador dedicado al cálculo científico que llegó a España estuvo destinado exclusivamente a los trabajos de la Junta de Energía Nuclear. Su nombre técnico era Univac Solid State 90 y fue adquirido por la JEN, en 1959. “A título de curiosidad hay que mencionar que todavía no habían llegado los lenguajes de programación (lo cierto es que IBM había desarrollado el FORTRAN en 1956, pero su uso estaba todavía muy restringido), y aquel esforzado grupo de jóvenes investigadores habrían de programar en código máquina. Es fácil imaginar que para cualquier programa de cálculo de mediano tamaño, las hojas de programación enseguida llegaban a kilos de papel”, se lee en *Historia Nuclear de España*. Según esta obra, el primer código de cálculo neutrónico realizado en esta máquina consistió en hacer inteligible para la UNIVAC un conjunto de cálculos que, realizados a mano por dos expertas, habían tardado veinte días en completarse: el ordenador las completó en doce minutos.

Con todo, a pesar de la enorme inversión que supuso, aquel modelo de la casa Remington Rand, con sus cinco toneladas y media de peso, estaba bastante limitado para lo que se esperaba de él; si se lograron introducir y utilizar unos códigos que superaban la capacidad del ordenador, se debe en buena parte al talento del director del equipo, el matemático Tomás Iglesias Garrido, convertido en aras de la necesidad en uno de los primeros expertos españoles en matemática informática.

Uno de los programadores que colaboró en el equipo de Iglesias, Florentino Briones, ha dejado en su *blog*, ‘Cosas que quiero contar’, un testimonio inapreciable de lo que suponía el trabajo diario con aquel ‘armario’, como lo define en la entrada *Mi primer ordenador* (5 de diciembre de 2012): la Remington tardó dos años en dar a los científicos españoles acceso al FORTRAN, y antes de eso, “la entrada



de datos y programas se hacía por medio de fichas perforadas de 90 columnas (en realidad, cada ficha contenía dos filas de 45 columnas, con cuatro posibles perforaciones redondas cada una). La salida de resultados también se obtenía en fichas perforadas, que debían llevarse luego a una tabuladora para imprimirlas. Por cada posición de las líneas impresas, la tabuladora tenía una barra vertical con todos los caracteres imprimibles. Las fichas perforadas iban leyéndose de una en una, y todas las barras se movían, subiendo y bajando, para colocar los caracteres adecuados frente a la cinta entintada. Con un golpe seco, las barras oprimían la cinta contra el papel y se imprimía una línea”. Aún más sorprendente que el enrevesamiento del sistema resulta la estimación que Briones hace sobre la capacidad de aquella máquina: referente a su memoria central, estima que “si contáramos en bytes, como actualmente, serían 25K bytes y... ¡Calculábamos reactores nucleares!”

En 1955, la JEN firmó un contrato en Nueva York para la construcción de un reactor nuclear en suelo español subvencionado con 350.000 dólares por el gobierno de Estados Unidos.

sobre las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki habían llegado incluso a la aislada España de entonces, pero entre bambalinas de los titulares terroríficos referidos a los bombardeos, algunas personas se interesaban por otras aplicaciones de aquella ingente fuente de energía. Aquí es donde aparece otro de los nombres clave, el teniente coronel José María Otero Na-

vascués, presidente de la Comisión de Física Aplicada y director del Laboratorio y Taller de Investigación del Estado Mayor de la Armada (LTIEMA), quien, gracias a su amistad con el agregado militar estadounidense, obtuvo de este como regalo a la institución una colección de revistas con abundantes artículos científicos sobre energía nuclear. Fue un valioso material

para ponerse al día de las líneas de trabajo que se estaban siguiendo en Estados Unidos, y para que Otero Navascués elaborara en 1947 un informe dirigido al Gobierno sobre el enorme potencial de este campo. El problema, como se reconocía en el propio informe, era la carencia casi absoluta de especialistas que pudieran hacerse cargo de él.



Arriba a la izquierda, visita de Franco. Debajo, un libro sobre el Proyecto Islero. En la foto grande derecha se puede ver el 2º Curso de Ingeniería nuclear de la JEN (1956). De izqda. a dcha., Laglere (Uruguay), Caro, Galván, Pezuela, Plevedel (Argentina); de pie: De Francisco, Vilallonga, Múgica (Uruguay), Bielza, Melches, A. de Toledo, Buergo, Urrutia y Marquez.

Al año siguiente, el 20 de abril, se celebró en el Instituto Nacional de Física y Química una conferencia sobre microscopía con contraste de fase, a cargo del profesor italiano Francesco Scandone. Los testimonios de algunos asistentes permiten reconstruir el hecho de que, en una charla posterior al acto, el profesor visitante preguntó, de manera casi casual en un principio pero enseguida con creciente avidez, si alguien podría informarle de la existencia en España de yacimientos de uranio. No tardó en quedar claro que, sin menosprecio del interés de su conferencia, el profesor Scandone estaba visitando España con el encargo preciso de averiguar la cantidad y disponibilidad de este elemento, del que los investigadores de su país tenían una acuciante necesidad. Terminó hablando con el general Juan Vigón, director de la Escuela Superior del Ejército e ingeniero de formación, y de aquellas conversaciones saldría una línea de actuación que pondría en marcha la energía nuclear en

España gracias al intercambio acordado de uranio a cambio de conocimiento.

En el libro de autoría colectiva *Historia Nuclear de España* se da cumplida cuenta de la muy discreta reunión celebrada el 8 de octubre de ese mismo año en el LTIE-MA, donde estuvieron presentes Otero Navascués, el catedrático de Química Orgánica de la Universidad de Madrid Manuel Lora Tamayo, el catedrático de Física de la Universidad de Madrid Armando Durán Miranda, y el oficial del cuerpo de intendencia de la Armada y miembro del cuerpo diplomático Jose Ramón Sobredo y Riobóo. Allí el primero informó a los otros tres de que acababan de ser nombrados vocales de la Junta de Investigaciones Atómicas (JIA), que el gobierno franquista había creado con una categoría de “carácter reservado” que implicaba el máximo secreto posible sobre sus propósitos y actividades.

Este secreto tenía su justificación en la conveniencia de ocultarse ante las posibles

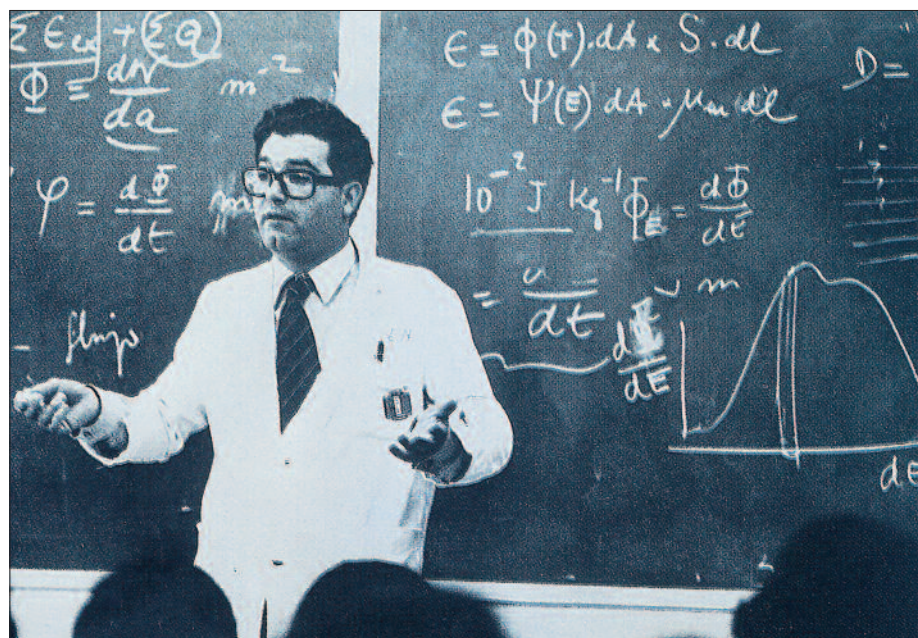
reticencias de Estados Unidos, indiscutible líder en la investigación nuclear, que podía no ver con buenos ojos la cooperación mutua en este terreno de dos países que habían sido aliados de Hitler en un conflicto mundial cuyos rescoldos aún hacían algo más que humear. Se optó por la creación de una empresa pantalla –Estudios y Proyectos de Aleaciones Especiales (EPALE)– que se encargara de ocultar con su nombre todos los procesos administrativos de ubicación de sede, contratación de personal y contacto con otros organismos españoles y extranjeros. En aquella reunión se decidió también la contratación del primer científico, Ramón Ortiz Fornaguera –con un sueldo nada despreciable para la época de 3.000 pesetas al mes– bajo la categoría profesional de ‘Colaborador de la Sección de Investigación Física’ sin mayores especificaciones que revelaran la naturaleza de sus futuras tareas.

El secreto duró lo bastante como para que fraguaran los cimientos, se comenzara

la formación científica y se suavizaran las relaciones con Estados Unidos, que en pocos años y –como es bien sabido– no sólo en el terreno nuclear, pasaron de la desconfianza a la colaboración abierta. La explotación de yacimientos en los terrenos que el Gobierno había reservado a favor del Estado en una Orden Ministerial de 1945 confirmó la riqueza esperada, e impulsó el pago en especies: con los primeros becados para estudiar en el Instituto de Física Nuclear de la Universidad de Roma y en el CISE de Milán viajaron 214 kilos de mineral de uranio, protegidos bajo el manto de la valija diplomática y custodiados por Armando Durán en representación de una Junta que carecía de identidad públicamente reconocida.

Los primeros especialistas

Sierra Albarrana, en Córdoba, y posteriormente Cáceres, Salamanca y Jaén fueron otras zonas que dieron yacimientos, antes de que se localizara el de Ciudad Rodrigo, que durante mucho tiempo se convirtió en el principal abastecedor de mineral de uranio en España. Por su parte, Carlos Sánchez del Río, Ramón Ortiz Fornaguera y María Aránzazu Vigón –hija, en efecto,



A. Brosed de la JEN, durante el desarrollo de una clase en las instalaciones del centro.

del general, pero que supo alejar la sombra del nepotismo gracias a un meritorio expediente académico y una sólida carrera profesional en su especialidad– se contaron entre los primeros científicos españoles que recibieron en instituciones académicas del extranjero una formación especializada. También, paralelamente, se iniciaron en España las primeras actividades relacionadas con la energía nuclear,

gracias a las gestiones de Otero Navascués, que trabajó sin descanso durante años para recuperar el terreno perdido y dotar a la investigación española del espacio que debía tener en el ámbito internacional. En 1950, Ortiz Fornaguera estaba trabajando en el Instituto de Física Nuclear de Chicago, y Otero Navascués aprovechó la amistad que había trabado con su director, Samuel K. Allison, para invitar a este a la Semana Nuclear, que se celebró en agosto de 1950 en Santander, donde se aseguró de que recibiera las más altas atenciones tanto en lo personal como en lo académico.

Al año siguiente, se abandonaron los disimulos, que ya en el ámbito científico llevaban tiempo siendo todo un secreto a voces, y, en 1951, fue creada de forma oficial la Junta de Energía Nuclear, acabándose así con años de siglas semiocultas y empresas pantalla que cada vez tenían menos sentido, ya que la entrada del nuevo organismo en la lista oficial de centros de investigación era necesaria si se quería continuar con una internacionalización imprescindible para su desarrollo. La visita de Allison había sido, entre otras cosas, una manera de corresponder al cambio de aires propiciado por Otero Navascués, cu-



Las maquetas de los proyectos de la Junta de Energía Nuclear atraían la visita de la población local.

yo trabajo había llevado a científicos y técnicos españoles a realizar estudios especializados ya no sólo en Italia o Estados Unidos, sino también en Alemania, Suiza y Gran Bretaña. Más tarde se invertirán las tornas y en el Instituto de Estudios Nucleares, dependiente del JEN, estudiarán becarios de Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Cuba, Chile, Ecuador, Filipinas, Guatemala, México, Paraguay, Pakistán, Perú, Uruguay y Venezuela. Además de Allison, España contará en sus cursos y conferencias con la presencia de otros científicos extranjeros de primer orden, como Werner Eisenberg, Paul Scherrer o Karl Wirtz.

Los dos primeros presidentes de la JEN fueron los generales Juan Vigón (1951-55) y Eduardo Hernández Vidal (1955-58),

pero ambos compartieron el buen ojo de dejar todas las tareas referentes a las relaciones internacionales en el director general, Otero Navascués, que finalmente ocuparía la presidencia tras la muerte de Vidal. Pocas dudas cabían de que era la persona idónea para representar al nuevo organismo en unos nuevos tiempos donde todas las partes se estaban, poco a poco, abriendo al exterior: la suspicacia de Estados Unidos frente a España se había ido diluyendo gracias a su valor estratégico frente a la amenaza soviética hábilmente aprovechado por el régimen y señalado por el Pentágono, que influyó en la firma de los Acuerdos Defensivos Hispano-Norteamericanos de 1953. Ese mismo año, Estados Unidos abrió un clima de cooperación internacional para el desarrollo de la

energía nuclear con fines pacíficos, que el mismo presidente Eisenhower anunció en su discurso “Átomos para la paz”, pronunciado en la sede de Naciones Unidas, y al que España no tardó en incorporarse.

Plena incorporación internacional

Desde entonces, no habría reunión internacional en la que no estuvieran presentes representantes de la JEN, desde el Congreso de 1954 en la Universidad de Ann Arbor (Michigan), hasta la decisiva Primera Conferencia de Ginebra, organizada por las Naciones Unidas al año siguiente. Como anécdota, cabe reseñar que entre los asistentes españoles a esta conferencia se encontraba Federico Goded Echevarría, que a lo largo de las décadas siguientes iba a dejar una impronta propia en el desarrollo y la divulgación del panorama nuclear español. Y, como hecho decisivo, que en Ginebra comenzaron las negociaciones entre España y Estados Unidos para que el primero se contara entre los primeros países europeos que contarán con un reactor nuclear facilitado gracias a la ayuda de la Administración Eisenhower.

Al año siguiente, la JEN firmó un contrato en Nueva York con la Internacional *General Electric* para la construcción de un reactor nuclear en suelo español, construcción subvencionada con 350.000 dólares del gobierno de Estados Unidos. Es bastante obvio, como señala José Manuel Sánchez-Ron en sus trabajos sobre la historia de la ciencia española, que los tratados suscritos entre los países para la cooperación estratégico-militar fueron un paso imprescindible para conseguir el reactor; sin los primeros, no habría llegado el segundo. Pero, una vez iniciada su construcción, España contaba con un pasaporte de entrada a las nuevas organizaciones que surgirían en la época, como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia Europea de Energía Nuclear (NEA), creada en el seno de la OCDE. En 1961 se incorporaría al



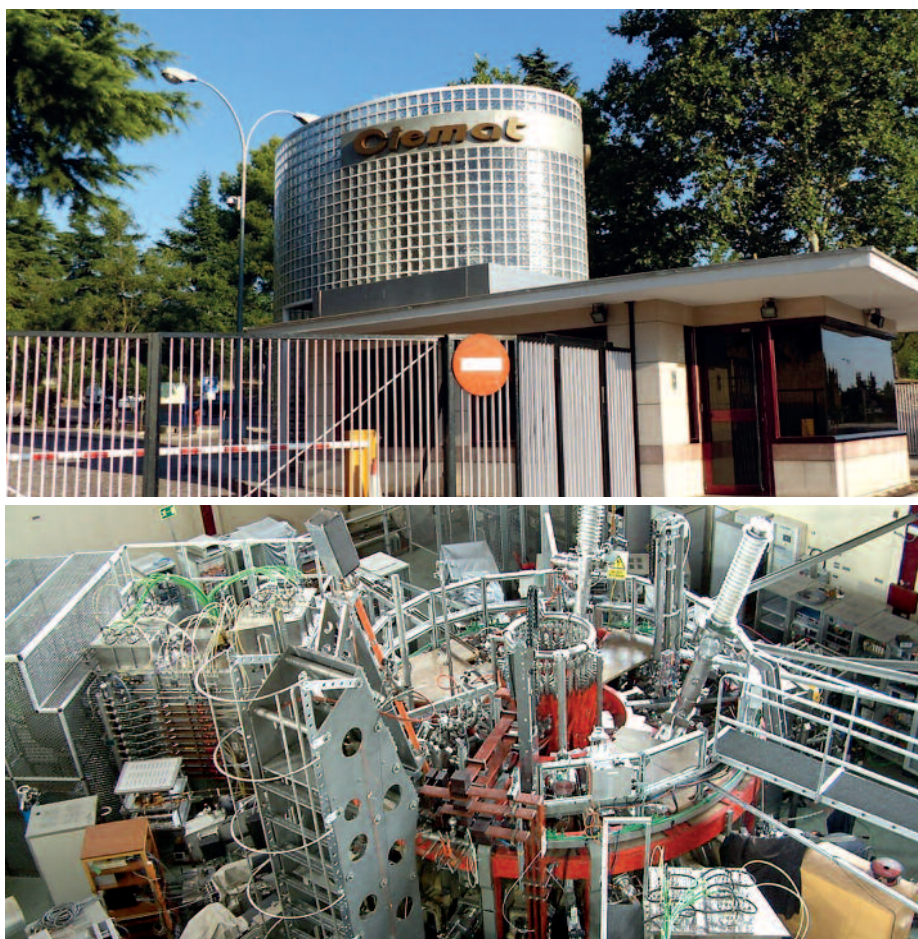
Visita a la JEN del Almirante Pita da Veiga (Ministro de Marina) y de G. López Bravo (Ministro de Industria).

CERN, que había nacido en 1954, para abandonarlo en 1968 y regresar en 1983.

Este primer reactor experimental, bautizado con el nombre tan inevitable como poco imaginativo de JEN-1, fue de los denominados de tipo piscina, ya que es dentro de una donde se alberga del núcleo del reactor, con el propósito de que el agua actúe a un tiempo como moderador, refrigerante y protección contra la radiación. Instalado en el Centro de Investigaciones Nucleares de la Moncloa, se hizo merecedor de su puesto en la historia inicial de la energía nuclear en España cuando el 8 de octubre de 1958 consiguió, por primera vez, una reacción de fisión en cadena.

Pero, ¿qué significó aquello más allá de la consecución de un hito puntual? En *Historia Nuclear de España* enumeran entre los principales usos a los que se destinó el reactor “la producción de isótopos (...). Sirvió además de bancos de ensayo de nuevos elementos combustibles, calibración de instrumentación nuclear, fuente de neutrones para realizar análisis por activación, experiencias de física nuclear y de reactores, neutrografía, difracción neutrónica, etcétera”. Un etcétera en el que destaca especialmente la formación de nuevos especialistas, ya que el JEN-1 fue siempre considerado como un primer paso en nuestro recorrido nuclear, al que seguirían otros para los que sería necesario contar con personal cualificado: por el primer reactor pasó un buen número de operadores que en los años siguientes trabajarían en sus sucesores –JEN-II, ARGOS, ARBI, CORAL-1– y en las primeras centrales nucleares.

Visto todo lo visto, se antoja enrevesado encontrar un punto definido de inicio, eso que suele llamarse un antes y un después que marque el momento en que España dejó atrás su etapa precursora y entró de lleno en la investigación y producción nuclear. Pudo ser en la inauguración de la JEN, en la presencia oficial en la Conferencia de Ginebra, en el momento en que



En la imagen superior, la sede del Ciemat; en la imagen inferior, Nave NBI.

se alcanzó aquella primera fisión. Hubo, desde luego, un momento en el que la mayoría de edad se impuso, y una de sus consecuencias fue, paradójicamente, la progresiva pérdida de competencias de su organismo madre. La JEN vio cómo las funciones relacionadas con el ciclo de combustible de nuclear pasaban a ser competencia de ENUSA, las de regulación al Consejo de Seguridad Nuclear y a ENRESA las de gestión de combustibles. Reducida a regular y centrar la investigación nuclear, terminaría perdiendo su nombre y absorbida por el CIEMAT en 1983.

No cabe duda de que los años transcurridos hasta ese momento fueron un periodo de crecimiento y evolución. Juan Manuel Kindelán recordaba, con motivo del 20º aniversario del CSN, que “la historia nuclear española podría definirse en dos grandes capítulos (...). El primero, en-

tre 1960 y 1980, se caracterizó por el surgimiento de la industria nuclear, su consolidación y la puesta en marcha de la mayor parte de las centrales nucleares españolas. El segundo se ha caracterizado por la estabilización del sector”.

Si por estabilización entendemos la tranquilidad que da moverse por la seguridad de un terreno ya construido y asentado por otros, entonces habrá que coincidir en todo lo que se debe a aquellos pioneros que combinaban el trabajo con el aprendizaje, la acumulación necesaria de conocimientos actualizados con su casi inmediata puesta en marcha.

El romanticismo con que se suele añorar los primeros tiempos tiende a ocultar la incertidumbre, la responsabilidad y el duro trabajo con el que se termina creando la estructura para la labor de generaciones posteriores.

¿Qué son los piezómetros?

■ Texto **Antonio Vela Guzmán** | Consejero técnico del Área de Ciencia de la Tierra | ■

El agua que se infiltra en el terreno se almacena en las rocas, rellenando los poros y fisuras totalmente (zona saturada) o parcialmente (zona no saturada) (Dibujo A). El límite superior de la zona saturada, en equilibrio con la presión atmosférica, se denomina nivel freático.

El agua almacenada tiende a moverse por gravedad desde las zonas de mayor cota de nivel freático a las de menor cota (gradiente hidráulico), dando lugar al flujo de agua subterránea, cuya velocidad también depende de la capacidad de las rocas para transmitir el agua (permeabilidad), que es función del porcentaje de poros/fisuras interconectadas de la roca. Las rocas más permeables forman acuíferos.

Al perforar el terreno (pozos o sondeos), el agua almacenada llena la perforación hasta la cota del nivel freático. Por debajo del nivel freático, la presión del agua en el acuífero aumenta. El nivel correspondiente a la presión en un sondeo abierto en un punto del acuífero, a una profundidad determinada, se denomina nivel piezométrico. El agua subterránea también puede estar confinada a elevada presión bajo materiales poco permeables. El nivel que alcanza el agua al perforar la capa confinante hasta equilibrarse con la presión atmosférica también es el nivel piezométrico.

Los piezómetros son sondeos de pequeño diámetro (50-150 mm) empleados para medir el nivel del agua subterránea (freático o piezométrico) (Dibujo B). Estos sondeos van entubados para darles estabilidad. La tubería se ranura en toda su longitud o bien se aíslan tramos filtrantes

para realizar medidas a la profundidad deseada. Interpolando los niveles medidos en cada piezómetro se pueden definir superficies piezométricas, que permiten establecer gradientes hidráulicos horizontales y verticales, determinar direcciones de flujo del agua subterránea y su velocidad, la cual dependerá también de la permeabilidad de los materiales (ley de Darcy). Los piezómetros también se utilizan para extraer muestras de agua, cuyo análisis determina su calidad radio-química, y para realizar ensayos de determinación de parámetros hidráulicos como la permeabilidad. La medida del nivel se realiza con dispositivos de registro puntual o continuo, en el tiempo. La extracción del agua se realiza con tubos tomamuestras o con pequeñas bombas. La información así obtenida, junto con las características de las formaciones geológicas y la climatología, permite resolver las ecuaciones que rigen el flujo del agua subterránea y el transporte de elementos disueltos en ellas. Para ello, se suelen utilizar modelos matemáticos que integran toda la información y permiten, además, realizar predicciones sobre el comportamiento del agua subterránea en las formaciones geológicas.

La hidrogeología es la ciencia que estudia el movimiento del agua subterránea, su composición química, el origen (en el ciclo hidrológico) y su evolución, así como los posibles usos potenciales. Es uno de los parámetros que se estudian en los emplazamientos de las Instalaciones del Ciclo del Combustible Nuclear para conseguir que su diseño cumpla los objetivos de la seguridad nuclear y la protección ra-

diológica de personas y del medio ambiente, que se concretan en garantizar:

a) La seguridad de la instalación en relación con la respuesta del terreno y estructuras al agua subterránea. La situación del nivel freático y sus fluctuaciones pueden afectar a la estabilidad del terreno (hinchamientos o colapsos, estabilidad de taludes, disolución, licuefacción...), originar cargas hidrostáticas sobre estructuras y dar lugar a filtraciones en edificios. También se analiza el efecto de la química del agua sobre los materiales constructivos (disolución, corrosión).

b) La protección radiológica de personas y del medio ambiente en relación con las aguas subterráneas, ya que es uno de los principales medios de movilización de elementos contaminantes, afectando a suelos, acuíferos y sistemas conectados (ríos, lagos, cultivos, etc.). Así, se analiza la capacidad del emplazamiento para transportar o atenuar posibles efluentes emitidos desde las instalaciones, en operación normal o en caso de accidente.

Los estudios hidrogeológicos permiten:

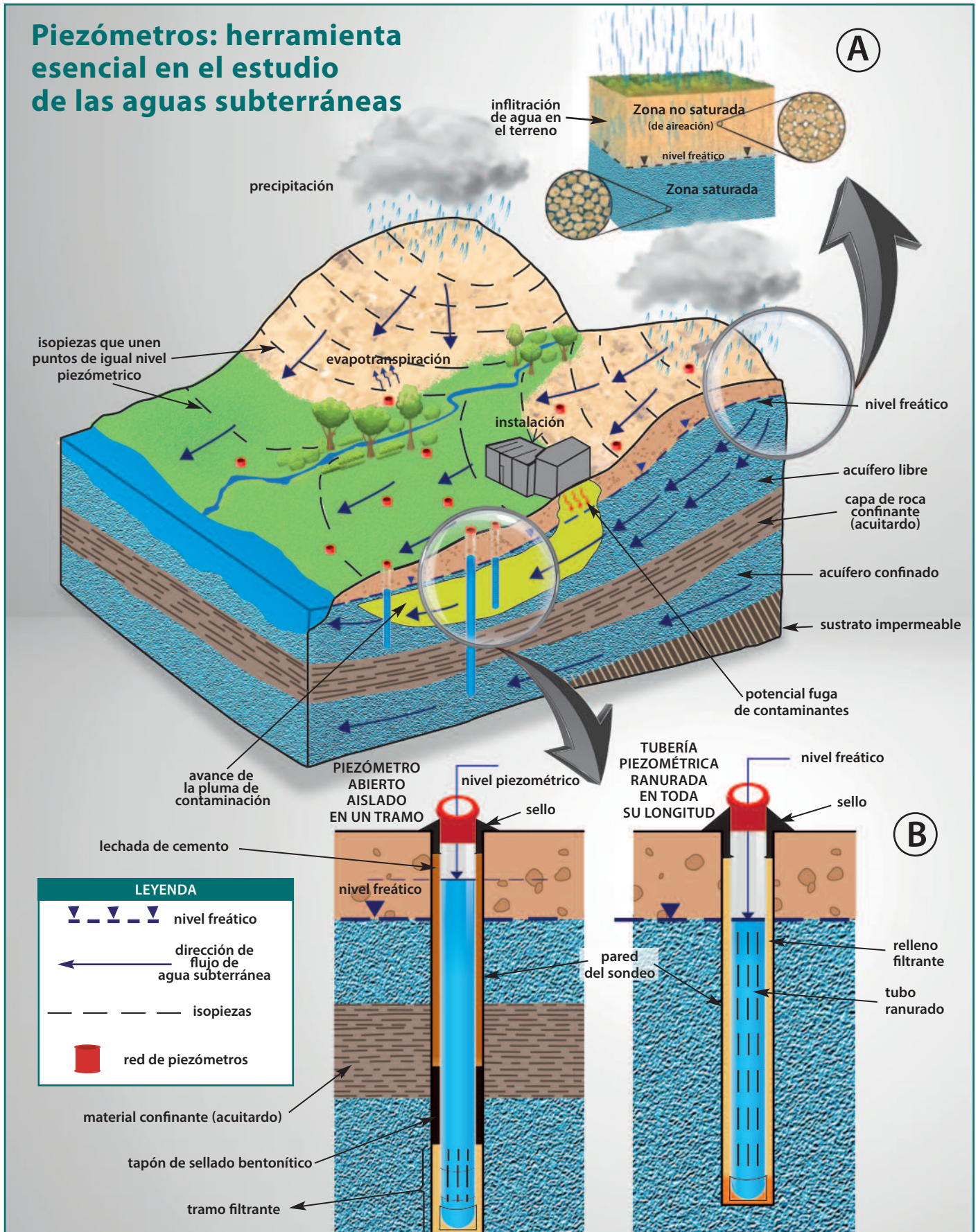
- Conocer el comportamiento de las aguas subterráneas y su interacción con la instalación, para determinar y prever posibles emisiones, y poder realizar un diseño seguro que las evite.

- Diseñar una red de vigilancia con piezómetros para detectar emisiones imprevistas en aguas subterráneas, que alertarían de algún fallo en la instalación.

- Prever la evolución del transporte de contaminantes, identificando vías preferentes y áreas receptoras.

- Establecer medidas correctoras y mitigadoras de los efectos de dichas emisiones. 

Piezómetros: herramienta esencial en el estudio de las aguas subterráneas



La gestión de los gases combustibles en las centrales nucleares españolas mediante el uso de recombinadores autocatalíticos pasivos

Tras el accidente ocurrido el pasado 11 de marzo de 2011 en la central nuclear de Fukushima Dai-ichi (Japón) los países de la Unión Europea sometieron a sus centrales a un conjunto de pruebas de resistencia para comprobar su capacidad de afrontar situaciones semejantes a las ocurridas en Japón. Como resultado de las pruebas, las centrales nucleares españolas identificaron diversos aspectos de mejora entre los que cabe destacar la instalación de un sistema de Recombinadores (de hidrógeno) Pasivos Autocatalíticos (PAR, por sus siglas en inglés). La instalación de este tipo de equipos es de especial

relevancia para salvaguardar no sólo la integridad de la contención, sino también de los equipos, sistemas y componentes ubicados en su interior, ya que permite reducir las concentraciones de hidrógeno generadas en caso de accidente severo, reduciendo así el riesgo asociado a la posible existencia de concentraciones elevadas en la atmósfera de la contención.

■ Texto **Sara González Veci** | Técnico del Área de Ingeniería de Sistemas de la Subdirección de Ingeniería del CSN | **Juan Manuel Martín-Valdepeñas Yagüe** | Técnico del Área de Análisis Probabilista de Seguridad | ■

Las centrales nucleares están diseñadas para ser capaces de soportar los accidentes denominados ‘accidentes base de diseño’. Estos accidentes han sido postulados como los máximos previsibles que pueden llegar a ocurrir durante la vida útil de una central.

Sin embargo, accidentes como el de la central nuclear de Three Mile Island o el de Fukushima, ocurridos en 1979 en EEUU y en 2011 en Japón, demostraron que era posible que se produjeran accidentes que fueran más allá de la base de diseño con fusión del núcleo. A este tipo de accidentes se les denomina accidentes severos.

En los accidentes severos se postula la pérdida de la capacidad de refrigeración del reactor, provocando un aumento de la temperatura del núcleo que ocasionará un daño en los elementos combustibles que podría llegar a causar su fusión.

Poco antes de la fusión del núcleo, los elementos metálicos de las varillas de combustible comenzarían a reaccionar

con el vapor de agua presente generando hidrógeno. Más adelante, en caso de que la fusión del núcleo progresara y provocara la rotura de la vasija y la eyección del núcleo fundido, se produciría la interacción entre el hormigón de la contención y el núcleo fundido (*Molten Corium Concrete Interaction*, MCCI), durante la que se generan tanto hidrógeno (H_2) como monóxido de carbono (CO).

Los gases anteriores son gases combustibles, cuya acumulación puede provocar atmósferas explosivas en el recinto de la contención. Dependiendo del tipo de régimen de combustión y de la cantidad de hidrógeno quemado, la sobrepresión producida podría llegar a amenazar la integridad de la contención.

El accidente de Fukushima, ocurrido el 11 de marzo de 2011, puso de manifiesto que esta generación de hidrógeno supone una amenaza real no sólo para la integridad de la contención, sino también para sistemas, equipos, componentes y edificios

de la central. La adecuada gestión del hidrógeno juega por tanto un papel importante en situaciones de accidente severo.

Combustión de gases en contención

Para que la reacción entre los gases combustibles y el oxígeno tenga lugar, es necesario tanto que la mezcla gaseosa de H_2 +CO/vapor/aire sea inflamable, como que haya presente una fuente de ignición. Las fuentes de ignición pueden ser equipos eléctricos, rotura de tuberías o partículas fundidas. A muy altas temperaturas se puede producir asimismo la ignición espontánea de la mezcla gaseosa.

Los mecanismos de combustión son fundamentalmente la deflagración y la detonación. Estos mecanismos de combustión se diferencian entre sí por la velocidad, estructura y mecanismo de propagación del frente de reacción. La principal diferencia entre ambos mecanismos de combustión es que, en una de-

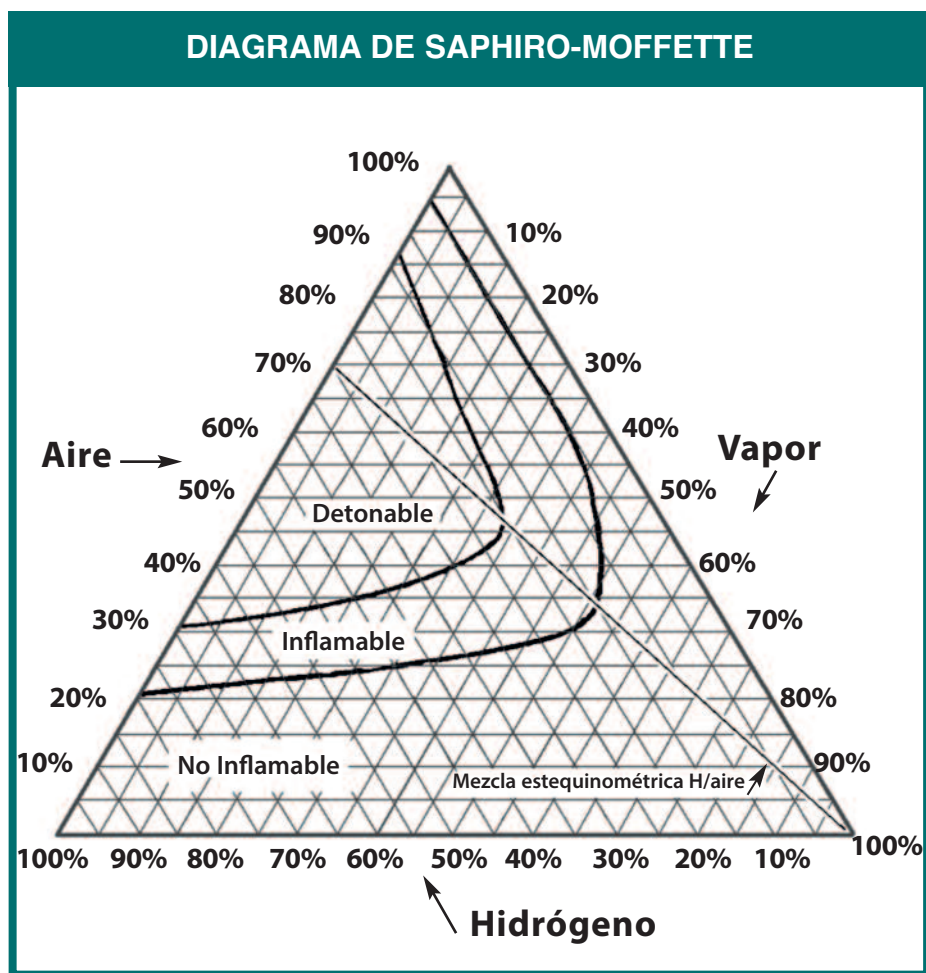


Figura 1. Esta clasificación distingue los regímenes de combustión en función de la composición de la mezcla.

flagración, el frente de reacción se propaga a velocidades subsónicas, y en una detonación, a velocidades supersónicas. Esta clasificación permite distinguir estos regímenes de combustión en función de la composición de la mezcla (diagrama de Saphiro-Moffette; ver Figura 1). Sin embargo, otros factores como la geometría, obstáculos de los recintos, la turbulencia, el tamaño de las mezclas, etcétera, hacen que se puedan dar regímenes intermedios como la deflagración con aceleración de llama (FA, por sus siglas en inglés) o transición de deflagración a detonación (DDT, por sus siglas en inglés) antes de llegar a la región de detonación del mencionado diagrama.

Los principales riesgos asociados a las combustiones de hidrógeno y monóxido de carbono en la contención son que se

pueden generar cargas de presión y de temperatura que amenacen tanto la integridad de la contención como de sistemas y equipos, estas cargas dependerán del régimen de combustión a que se produzcan.

Mitigación de los riesgos

Existen diversas medidas de seguridad para mitigar los efectos del hidrógeno

Se ha comprobado que la adecuada gestión del hidrógeno en situaciones de accidente severo juega un papel importante en la integridad de la contención

generado en caso de accidente severo. De manera general, se podrían agrupar de acuerdo con objetivos asociados a niveles de defensa. Estos objetivos son la prevención de mezclas inflamables y, en caso de que esto no sea posible, el evitar que se alcancen presiones y temperaturas inaceptables como consecuencia de una combustión. Esto se consigue mediante el control de oxígeno y/o el control del hidrógeno/CO.

El control del oxígeno de la atmósfera de la contención se consigue mediante su inertización, inyectando un gas inerte, normalmente nitrógeno, que reduzca la concentración de oxígeno hasta condiciones no inflamables. Esta inertización puede realizarse durante la operación normal de la planta (pre-inertización) o una vez que se haya producido el accidente (post-inertización).

Para el control de los gases combustibles se pueden utilizar diversas estrategias, que se muestran a continuación:

- El mezclado de la atmósfera de la contención, ya sea mediante convección natural o forzada. Con esta estrategia se consigue diluir el hidrógeno en el aire presente en la contención, evitando que se produzcan acumulaciones locales de hidrógeno.
- El uso de recombinadores de hidrógeno. Estos equipos provocan la reacción del hidrógeno con el oxígeno mediante incremento de la temperatura o el uso de catalizadores, permitiendo una reducción de la concentración de ambas especies. Los recombinadores de hidrógeno pueden ser de tipo eléctrico, diseñados normalmente para hacer frente a un accidente base de diseño, o Recombinadores Pasivos Autocatalíticos (PAR, por sus siglas en inglés), diseñados para actuar de forma pasiva, sin necesidad de alimentación eléctrica.

- El uso de ignitores, en los cuales se generan chispas que inician la reacción de combustión al alcanzar las mezclas las condiciones de inflamabilidad. Pueden funcionar con concentraciones de gases combustibles dentro de los límites de inflamabilidad, pero necesitan suministro eléctrico.

Antes del accidente de Fukushima, las centrales nucleares españolas ya contaban con recombinaidores eléctricos e ignitores (estos últimos solo en centrales de diseño BWR), además de sistemas de mezclado de la atmósfera de la contención y estrategias específicas en las Guías de Gestión de Accidente Severo (GGAS). Cabe destacar el caso de central nuclear Trillo (PWR KWU), que instaló un sistema de Recombinadores Pasivos Autocatalíticos.

Tras el accidente de Fukushima y las pruebas de resistencia que se llevaron a cabo en las centrales europeas, se vio la necesidad de incorporar medidas adicionales para el control de los gases combustibles en accidente severo. Como consecuencia de este proceso, las centrales nucleares españolas han incorporado un sistema de Recombinadores Pasivos Autocatalíticos (PAR, por sus siglas en inglés), que no necesita sistemas soporte activos para llevar a cabo su función de seguridad.

La presencia de los PAR en la contención no sólo reduce el riesgo asociado a la presencia de gases combustibles, sino que también facilita su gestión al reducir la concentración de los mismos. No obstante, continúa siendo necesario garantizar una gestión adecuada de estos gases combustibles.

En este sentido, con un diseño adecuado de los PAR (número y distribución), es poco probable que la concentración media de hidrógeno en la contención alcance valores elevados.

Sin embargo, en fases de liberaciones

bruscas de gases combustibles procedentes tanto de situaciones imprevistas (por ejemplo en caso de rotura), como derivadas de estrategias incluidas en las Guías de Gestión de Accidente Severo (por ejemplo el aumento de la generación de hidrógeno por inyección de agua al núcleo sobrecalentado) los PAR podrían no tener tiempo de reducir localmente esas concentraciones.

Diseño y ubicación

El objetivo de los PAR es limitar las concentraciones de gases combustibles en caso de accidente severo, de manera que

Las centrales nucleares españolas han incorporado un sistema de recombinaidores pasivos autocatalíticos, que no necesita sistemas soporte activos para llevar a cabo su función de seguridad

se reduzca la probabilidad de detonaciones o deflagraciones que puedan amenazar la integridad de la contención.

Los PAR son equipos compuestos por una carcasa de acero inoxidable en cuyo interior se encuentran ubicadas unas placas metálicas o cartuchos cerámicos recubiertos por un catalizador (Pt o Pd). Estos equipos son capaces de recombinar tanto hidrógeno, como monóxido de carbono.

Los PAR están abiertos por la parte inferior y superior con objeto de facilitar la circulación de la mezcla de gases de la contención. Durante su funcionamiento se produce una reacción exotérmica que provoca un aumento de temperatura, que favorece la circulación natural de los

gases a través del recombinaidor. Un esquema de este tipo de equipos se muestra en la figura 2.

Los catalizadores utilizados en los PAR deben mantener sus características funcionales durante las condiciones de operación normal de la planta. Para garantizar que esto es así, los PAR están sometidos a un programa de mantenimiento.

Tanto el diseño de los recombinaidores como su ubicación es de tal manera que la capacidad funcional de la actividad catalítica puede ser verificada según procedimientos de prueba periódica.

Los sistemas de PAR instalados en las centrales nucleares están compuestos por un número y tamaño determinado de recombinaidores ubicados en localizaciones específicas, de manera que se reduzca tanto como sea posible la probabilidad de que se produzcan detonaciones o deflagraciones.

Para el dimensionamiento de estos sistemas los pasos principales a seguir son: calcular los gases combustibles generados durante los accidentes severos considerados creíbles, determinar cuáles es su distribución en la contención y establecer unos criterios de aceptación adecuados.

Cálculo de gases combustibles

En caso de accidente severo, en el que por definición el núcleo ha sufrido un daño importante, pueden distinguirse dos fases: in-vessel y ex-vessel.

Durante la fase in-vessel, en la que el núcleo permanece en el interior de la vasija, la generación de hidrógeno procede mayoritariamente de la reacción entre el metal de las vainas del combustible y el vapor.

Durante la fase ex-vessel, en la que se ha producido el fallo de la vasija, la generación de CO y de hidrógeno procede fundamentalmente de la interacción entre el núcleo fundido que ha caído desde

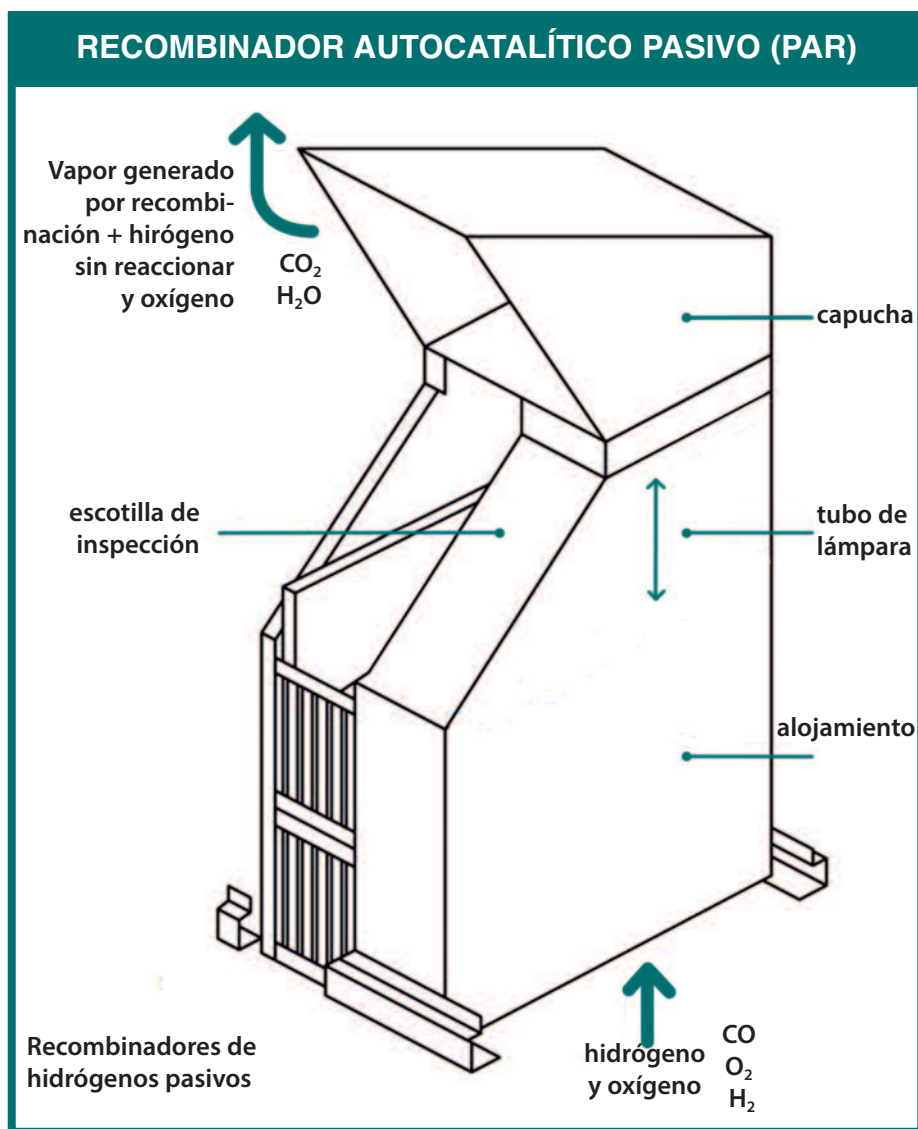


Figura 2. En la imagen superior, un esquema del funcionamiento de un PAR.

la vasija y el hormigón de la contención (MCCI).

Para realizar los cálculos de generación de gases combustibles existen diversos códigos de cálculo. En concreto, las centrales nucleares españolas han utilizado el código de cálculo MAAP. Éste código resuelve de forma simplificada las ecuaciones de la fluidodinámica y la transmisión de calor y tiene modelos y correlaciones específicas para el cálculo de la degradación del núcleo tanto en la vasija como fuera de ella.

El primer paso para la elaboración de estos cálculos es seleccionar los escenarios accidentales creíbles que sean más

limitantes en lo que respecta a la generación de gases combustibles.

Se trata de una fase de especial relevancia, en la que en las centrales nucleares españolas han utilizado tanto los modelos de riesgo de las centrales como el juicio de ingeniería y la experiencia internacional.

En esta primera fase se han seleccionado las secuencias genéricas más relevantes en lo que respecta a la generación de hidrógeno y de CO. En concreto, estas han sido el LOCA (*Loss Of Coolant Accident*) grande, el LOCA pequeño y el SBO (*Station Blackout*). Para el caso de centrales BWR también ha resultado ser re-

levante la pérdida total de agua de alimentación.

Una vez seleccionadas las secuencias anteriores, se han elaborado unos cálculos iniciales con MAAP, considerando la disponibilidad de diversos sistemas de mitigación con un potencial impacto sobre la generación de hidrógeno y CO o su evolución en la contención, como por ejemplo el agua de alimentación auxiliar, el rociado de la contención, las unidades de refrigeración de la contención, la actuación de la inyección de seguridad o el aporte a la cavidad del reactor.

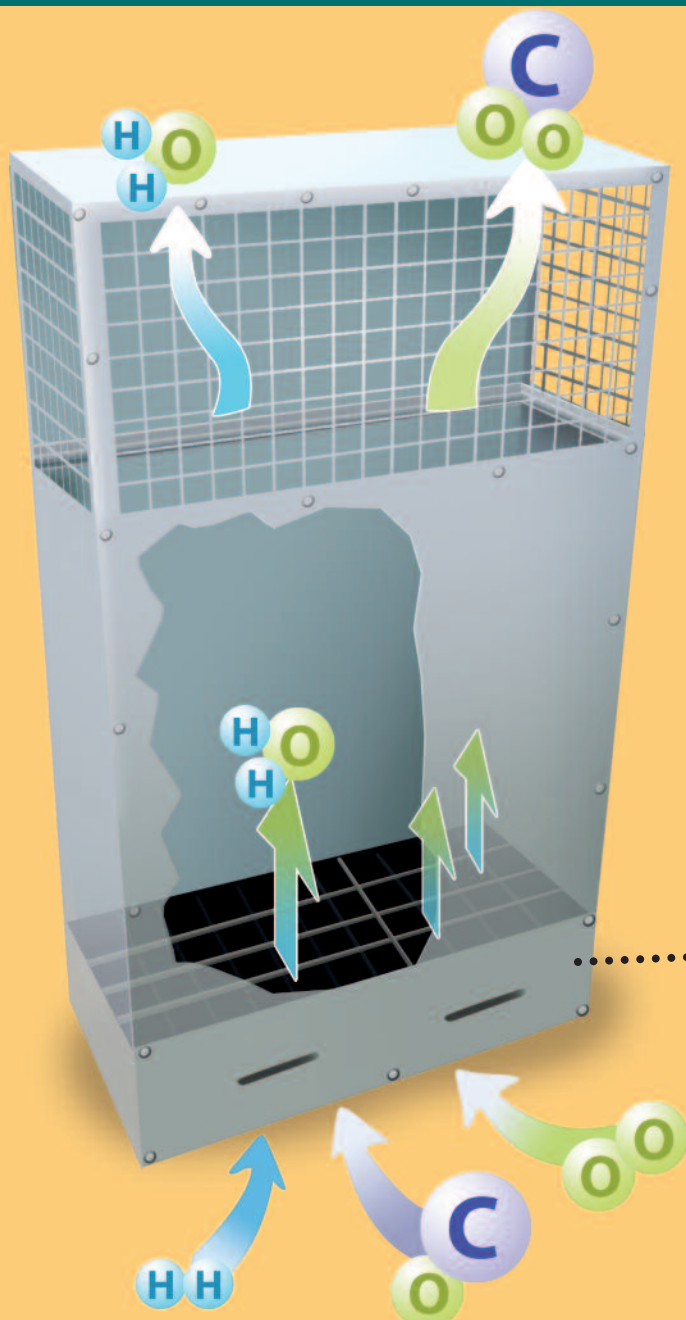
A partir de los resultados anteriores se han obtenido las denominadas secuencias base, sobre las que se han realizado unos análisis de sensibilidad, con el objetivo de tener en cuenta secuencias desfavorables desde el punto de vista de la generación de hidrógeno y CO tanto in-vessel como ex-vessel.

Durante la elaboración de estos cálculos, se han identificado algunos aspectos que cabe destacar por su especial relevancia tanto sobre la generación de gases combustibles, como es el efecto de la composición del hormigón, como sobre el incremento de la concentración de dichos gases, como son el efecto del rociado de la contención y de las unidades de refrigeración.

En el primer caso, hormigones con un alto contenido en agua y/o dióxido de carbono han mostrado mayores generaciones de hidrógeno y/o CO durante la interacción entre el corium fundido y el hormigón.

El efecto del rociado de la contención o de unidades de refrigeración es de especial relevancia durante las estrategias de mitigación del accidente severo ya que como consecuencia de su actuación o recuperación tardía, la composición de la atmósfera de la contención podría verse modificada al condensar el vapor de agua presente, viéndose incrementadas

Principios de funcionamiento de un PAR



Los PAR están constituidos por una estructura de acero inoxidable que dispone en su interior de placas catalíticas para realizar la recombinación del hidrógeno. La estructura es abierta, no presurizada y está diseñada para promover la convección natural, con una entrada de gas por la parte inferior y una salida lateral por la parte superior.

Ventajas del PAR

- ✓ Auto inicio
 - ✓ No depende de una fuente de alimentación extra
 - ✓ Se puede colocar en cualquier lugar de contención
 - ✓ Sin acumulación de presión
 - ✓ Acceso libre a toda el área de contención.
- No requiere soporte vital para el personal que trabaja durante el funcionamiento / mantenimiento regular de la planta.

Hidrógeno eliminado (aire, vapor, CO₂, H₂ y CO)



Hidrógeno mezclado (aire, H₂, CO)

Datos generales de diseño de un PAR

Material principal de la estructura	Acero inoxidable
Material base de las placas catalíticas	Acero inoxidable resistente a altas temperaturas
Catalizadores	Platino / Paladio
Medio	Aire, mezcla gas-vapor, H ₂ , CO, aerosoles, gases nobles
Tipo	FR1-1500T
Tasa de eliminación de hidrógeno	5,36 kg/h
Número de placas catalíticas	150
Dimensiones de las placas	140 x 290 mm
Dimensiones de la estructura	1550 x 1400 x 326 mm
Peso total	130 kg

Funcionamiento del PAR

Los PAR constituyen un sistema completamente pasivo. Su única función es la eliminación de gases combustibles liberados a la contención en caso de un accidente severo. Por tanto, su instalación no tiene ningún efecto en la operación normal de la central.

En caso de accidente, el proceso catalítico se pone en marcha automáticamente cuando la concentración de hidrógeno alcanza el 2% y la temperatura alcanza 50°C.

las concentraciones de oxígeno y gases inflamables.

Distribución de gases combustibles

Para la determinación del número y ubicación de los PAR en la contención, uno de los aspectos clave es conocer cómo se prevé que sea la distribución de los gases combustibles generados en contención. En este sentido, se han identificado los siguientes aspectos como especialmente relevantes:

- Localización de los puntos de emisión durante la fase in-vessel. Para su adecuada localización, durante la elaboración de los cálculos se deben seleccionar puntos de emisión diversos, destacando la importancia de las liberaciones en los puntos altos de la contención, dada la baja densidad de los gases combustibles.
- Acumulaciones locales. Este aspecto es de especial relevancia en contenciones compartimentadas, ya que pequeñas liberaciones de hidrógeno en ciertos cubículos podrían llegar a producir acumulaciones tales que generasen atmósferas explosivas.
- Fenómenos de estratificación. Dada la baja densidad de los gases combustibles, pueden producirse fenómenos de estratificación, con acumulaciones en las partes altas de la contención.

La selección de un código de cálculo adecuado es, por tanto, de especial importancia para la modelización de los fenómenos anteriores.

Existen diferentes códigos de cálculo que permiten obtener la distribución de los gases combustibles en la atmósfera de la contención.

Los códigos ‘lumped-parameter’ (MAAP, MELCOR, WAVCO) o de parámetros promediados, se basan en la hipótesis fundamental de que en regiones macroscópicas predefinidas, deno-

minadas ‘volúmenes de control’, las variables termodinámicas son homogéneas resolviendo de forma simplificada las ecuaciones de la fluidodinámica y la transmisión de calor.

Este tipo de códigos tienen como principal ventaja la velocidad de computación, aunque no son capaces de predecir algunos fenómenos tales como las estratificaciones o acumulaciones locales de gases combustibles.

En lo que respecta a los códigos CFD (CFX, FLUENT), éstos son capaces de predecir concentraciones locales de gas, sin embargo requieren tiempos de computación muy largos.

En 2013, el CSN estableció unos criterios de evaluación de las modificaciones de diseños post-Fukushima. En relación con los PAR, estos criterios establecían que debían ser capaces de limitar las concentraciones de hidrógeno en contención durante las fases del accidente severo

Una estrategia intermedia es la utilización de códigos con características de ‘lumped-parameter’ y capacidades 3D (GOTHIC), que permiten realizar cálculos de contención suficientemente precisos en menores tiempo de cálculo que los CFD.

En España se han utilizado diversos códigos de cálculo para analizar la distribución de los gases en contención, el comportamiento y dimensionamiento de los PAR en diversos estudios realizados en los últimos veinte años. Las centrales nucleares han utilizado los códigos MAAP,

WAVCO y GOTHIC, el CIEMAT el código MELCOR y FLUENT y la UPM los códigos CFX, MELCOR y GOTHIC.

Criterios de aceptación

Una vez analizado el comportamiento de los gases combustibles, para establecer el número de recombinadores a instalar, es necesario establecer unos criterios de aceptación en lo que respecta a las potenciales deflagraciones y detonaciones y sus efectos sobre la integridad de la contención.

En noviembre de 2013, el CSN estableció unos criterios de evaluación a considerar en las modificaciones de diseños post-Fukushima. En relación con los PAR, estos criterios establecían los mismos debían ser capaces de limitar las concentraciones de hidrógeno en contención durante las diferentes fases del accidente severo.

Para cumplir estrictamente con este criterio, una vez realizado el análisis de distribución de gases indicado en el apartado anterior, habría que realizar cálculos de combustión de las mezclas identificadas, así como la posible respuesta de la contención a las ondas de presión generadas por estas combustiones. Sin embargo, este tipo de análisis son muy complejos, están sometidos a grandes incertidumbres e involucran tiempos de cálculo excesivos para aplicaciones prácticas.

En este sentido se han desarrollado criterios prácticos para evitar la realización de estos cálculos de combustión. Se han definido los criterios SIGMA y LAMBDA que se basan en identificar el momento de transición a los regímenes de combustión que producen mayores cargas de presión:

- Criterio SIGMA: es la relación entre las densidades antes y después de la combustión (relación de expansión de la mezcla gaseosa) y permite determinar si se puede dar la acelera-



La instalación de PAR en todas las centrales nucleares españolas ha supuesto un refuerzo significativo de la seguridad. La presencia de PAR en la contención no sólo reduce el riesgo asociado a los gases combustibles, sino que también facilita su gestión al reducir su concentración.

ción de llama (FA, por sus siglas en inglés).

- Criterio LAMBDA: relaciona el tamaño de la celda de detonación y la longitud característica de la mezcla con objeto de determinar el momento de la transición de deflagración a detonación (DDT, por sus siglas en inglés).

Otro de los criterios de aceptación más comúnmente utilizados es la concentración media de gases combustibles de la contención. Para la utilización de este criterio, que es muy simplificado, hay que seleccionar una concentración media de gases combustibles suficientemente conservadora para asegurar que el régimen de combustión no produzca FA o DDT, es decir, que permita cubrir los criterios anteriores y sus incertidumbres en todas las posibles situaciones. Además, se han establecido otros criterios de aceptación que tienen por objeto limitar la presión en la contención, de manera que en caso de deflagración, esta no supere una determinada probabilidad de fallo.

Si la concentración media de gases combustibles es suficientemente baja, la velocidad de llama normalmente será subsónica y el incremento de presión en la contención será cuasiestática. En estos casos, para el cálculo de la presión en contención podrá suponerse una combustión completa isocórica y adiabática (AICC, por sus siglas en inglés), que se puede comparar con la presión de fallo de la contención.

En el caso de que no se puede descartar la FA y DDT la presión de AICC no sería conservadora, ya que habría que tener en cuenta el efecto de las cargas dinámicas sobre la contención.

No obstante, aunque las condiciones globales de los gases en la contención cumplan los criterios anteriores, los cálculos muestran que en algunos casos podrían producirse picos puntuales y locales en los que las mezclas de gases podrían superar alguno de los criterios. Estos picos puntuales corresponden a generaciones muy rápidas de hidrógeno en

los que los PAR no cuentan con tiempo suficiente para recombinar los gases combustibles.

Finalmente, y con objeto de concretar la disposición definitiva de los recombinadores, en las centrales nucleares españolas se han realizado unas rondas por planta para verificar la viabilidad de la instalación de los PAR en las zonas propuestas.

La instalación de PAR en todas las centrales nucleares españolas ha supuesto un refuerzo significativo de la seguridad.

La presencia de PAR en la contención no sólo reduce el riesgo asociado a los gases combustibles, sino que también facilita su gestión al reducir su concentración. En este sentido, es muy improbable que la concentración media de gases combustibles en la contención durante el desarrollo de un accidente creíble pudiera alcanzar valores elevados. Las Guías de Gestión de Accidente Severo contemplan asimismo medidas adicionales para su gestión. 

Reacción en cadena

TRANSPORTE

El tren monorraíl chino que quiere revolucionar las megaciudades en desarrollo

Las grandes ciudades en vías de desarrollo se caracterizan por un caos circulatorio donde las infraestructuras viarias crecen a un ritmo muy inferior al de la compra de vehículos, lo que se traduce en atascos interminables de difícil solución, contaminación y ruido. En este escenario, la compañía china BYD de vehículos eléctricos ha diseñado un sistema de monorraíl elevado, con el que quiere revolucionar la movilidad de estas megalópolis.

A primera vista, el *SkyRail* puede parecer un simple tren de aspecto futurista, pero lo cierto es que esconde algunas ventajas significativas. “El principal atractivo está en que su construcción cuesta la quinta parte de una línea de metro y se concluye en una tercera parte del tiempo”, explica Richard Li, uno de los responsables de comunicación de la marca con sede en Shenzhen.

El monorraíl cuenta con tres vagones capaces de transportar a 200 personas cada uno. Debido al uso de ruedas de caucho que abrazan el raíl de forma horizontal, sorprende por lo silencioso de sus ope-



La idea del ‘SkyRail’ se ha exportada a varios países, como Egipto, Brasil o Marruecos.

raciones y por la fluidez con la que se mueve a pesar de que algunas de las curvas son muy pronunciadas. A diferencia de lo que sucede con las líneas subterráneas de metro, los pasajeros disfrutan de las vistas que ofrece el viaje, mientras que el costo de las operaciones –su consumo de energía es mínimo– y el nivel de seguridad que ofrece –sobre todo, porque evita la posibilidad de colisión que lastra a tranvías y trolebuses– son superiores a los del ferrocarril convencional. “Además, como es un sistema elevado, se puede instalar en carreteras que ya están construidas”, añade Li. No en vano, en el complejo fabril de

BYD el *SkyRail* ‘vuela’ por encima de las principales arterias para vehículos a una velocidad punta de 90 kilómetros por hora. Y en el distrito de Pingshan, en Shenzhen, una línea se está erigiendo también sobre carreteras ya existentes.

La empresa fabricante afirma que, de esta forma, se puede duplicar el número de personas que transitan por estos corredores de dos pisos, ya que el monorraíl ofrece capacidad para transportar hasta 40.000 personas por hora y dirección –30.000 menos que un sistema de metro convencional–. Además, BYD está convencida de que las megalópolis del futuro estarán construidas

en tres niveles: metro de alta capacidad en el subsuelo, vehículos eléctricos y peatones en superficie, y sistemas de ferrocarril ligero elevados.

Actualmente, las 22 redes de *SkyRail* en fase de diseño, construcción y operación suman ya unos 350 kilómetros. La primera línea se inauguró el año pasado en la ciudad de Yinchuan, y este año se ha actualizado para convertirla en autónoma. Mientras

tanto, países como Filipinas, Camboya, Egipto o Marruecos ya han firmado acuerdos para implantar estos monorraíles en algunas de sus localidades, y la ciudad brasileña de Salvador se ha convertido en la primera que comienza a construir un *SkyRail* en América Latina. Las autoridades municipales han considerado que es la mejor solución debido a la capacidad del monorraíl para enfrentar desniveles pronunciados –en un tramo de 400 metros, debe escalar 80– y a la facilidad con la que se puede construir parte del trazado sobre el agua. Los 20 kilómetros de la línea costarán unos 689 millones de dólares..

Pasta nuclear, el material más duro del Universo

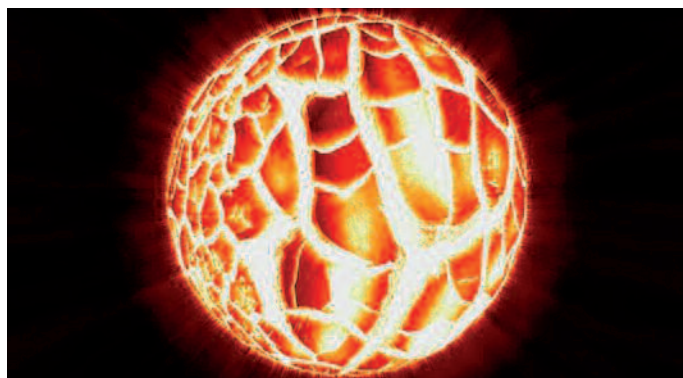
Se encuentra bajo la corteza sólida de las estrellas de neutrones y es diez mil millones de veces más fuerte que el acero. Tres investigadores de diferentes instituciones de Estados Unidos y Canadá han encontrado evidencias de que esa pasta indestructible podría existir realmente, justo por debajo de la superficie de las estrellas de neutrones y que ese material, que en las simulaciones adquiere formas de espaguetis, ñoquis o láminas de lasaña sería, además, el más duro y resistente de cuantos existen en el Universo. El trabajo de Matthew Caplan, investigador de McGill University; A. S. Schneider, de la Universidad de Indiana, y J. Horowitz, del Instituto de Tecnología de California, será publicado antes de que finalice 2018 en la revista norteamericana *Physical Review Letters*.

Investigaciones anteriores sobre esta materia ya habían demostrado que cuando las estrellas llegan a una cierta edad, pueden explosionar y colapsarse en una masa extremadamente densa y compuesta fundamentalmente de neutrones. El material, extraordinariamente comprimido, se vuelve cien billones de veces más denso que cualquier objeto de la Tierra, por lo que no hay forma de estudiarlo en laboratorio. Y su inmensa gravedad obliga a que sus capas externas se congelen en una superficie sólida extremadamente dura y fuerte. “La dureza de la corteza de una estrella de neutrones”, recuerda Caplan, “resulta relevante para una gran cantidad de problemas de astrofísica, pero es algo que aún no comprendemos bien”.

Ahora, la nueva investigación va un paso más allá y sugiere que el material que se encuentra apenas a un kilómetro por debajo de la superficie sólida de una estrella de neutrones podría ser aún mucho más fuerte. Según la teoría de estos investigadores, a medida que una estrella de neutrones se instala en su nueva configuración, los neutrones densamente empaquetados sufren toda clase de presiones y tirones, lo que les lleva a dar lugar a nuevas formas bajo la superficie. Formas que unas veces son redondeadas, como los ñoquis, que se estiran en tubos finos, como los espaguetis, o se extienden en finas láminas, anchas y planas, como la pasta de la que está hecha la lasaña.

Caplan, Schneider y Horowitz llevaban tiempo preguntándose por la densidad de estas curiosas formaciones y querían saber si estas podrían, incluso, superar la dureza de la “corteza neutrónica”. Para averiguarlo, pusieron en marcha una serie de simulaciones informáticas, que necesitaron para completarse de dos millones de horas de tiempo de procesador, algo que un ordenador con una sola CPU habría tardado 250 años en hacer.

Caplan y sus colegas pudieron con estas simulaciones estirar y deformar a su antojo el material que se oculta bajo la corteza de las



La ‘pasta nuclear’ es 10.000 millones de veces más fuerte que el acero.

estrella de neutrones y averiguar sus propiedades. En efecto, las simulaciones mostraron que la ‘pasta nuclear’ era mucho más fuerte y dura que el material de la corteza estelar; concretamente, 10.000 millones de veces más fuerte que el acero.

LIBROS

Severo Ochoa no era de este mundo

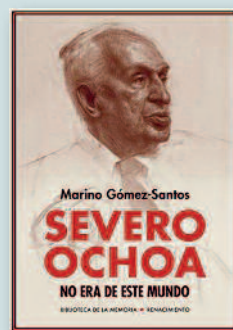
Marino Gómez Santos

Editorial Renacimiento. 336 páginas

Un libro informado y demoledor sobre la figura y el legado éticocientífico del Nobel Severo Ochoa. No es una biografía al uso, ni un pedregoso estudio con pretensiones científicas, sino unas muy singulares y verídicas memorias del escritor Marino Gómez Santos, centradas en su relación vital con el científico y premio Nobel Severo Ochoa (Luarca, 1905-Madrid, 1993), del que Gómez Santos fue no solo amigo y confidente durante más de veinticinco años, sino también biógrafo y albacea testamentario.

Pero es, además, un durísimo y bien documentado alegato acerca de las manipulaciones y tergiversaciones que ha ido sufriendo, tras su muerte en 1993, la figura y el legado ético y científico de Ochoa.

Marino Gómez-Santos ha cultivado la historia contemporánea a través del género biográfico. Además de Gregorio Marañón, es el primer biógrafo de Severo Ochoa, Francisco Grande Covián y la reina Victoria Eugenia. Autor de más de un centenar de semblanzas científicas, entre sus libros más difundidos figuran *Vida de Gregorio Marañón*, *Baroja y su máscara* y *El tiempo de Sebastián Miranda*.



ENERGÍA

El único yacimiento de gas en España multiplicará por cuatro su producción en 2020

El yacimiento de gas de Viura, en La Rioja, prácticamente el único de este tipo que se explota en España, ampliará su infraestructura con el fin de dar un acelerón a la extracción de esta materia prima. El consorcio liderado por Unión Fenosa Gas, adjudicatario de la concesión desde mediados del año pasado, ultima la construcción de un nuevo pozo, de unos cuatro kilómetros de profundidad, para multiplicar por cuatro el ritmo de producción, hasta alcanzar el millón de metros cúbicos diarios en 2020, cuando la nueva instalación esté funcionando a pleno rendimiento.

El entorno de Sotés, a 10 kilómetros de Logroño, reúne más del 90 por ciento



En la imagen, las instalaciones del yacimiento de gas de Viura (La Rioja).

del gas localizado en el subsuelo del territorio nacional. Una cantidad de aproximadamente 3 BCM (3.000 millones de metros cúbicos) de gas natural convencional, que se estima contiene el yacimiento descubierto a finales de la pasada década. Desde entonces, la producción de gas natural convencional que se encuentra en el yacimiento ha alcanzado

máximos en el entorno de los 280.000 metros cúbicos diarios. Sin embargo, el consorcio ha determinado que es hora de hacer un esfuerzo adicional para elevar ese ritmo, con la construcción de un nuevo pozo principal y la posibilidad de ampliar la instalación con algún otro complementario con el objetivo de cuadruplicar la producción.

INFORMÁTICA

Ya está aquí el ordenador cuántico

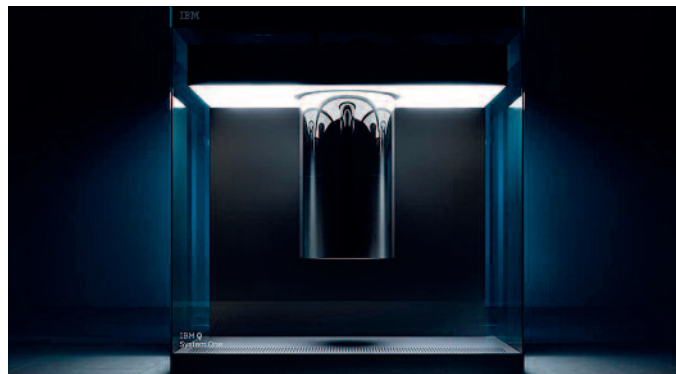
El gigante informático IBM ha presentado, en Las Vegas, el Q System One, el primer ordenador cuántico integrado para uso comercial. La multinacional ya anunció en 2017 sus planes para construir estos sistemas, que superarán en velocidad y capacidad de cálculo a los supercomputadores actuales más potentes. La idea era desarrollar los IBM Q comerciales con 50 qubits (*quantum bits*) en los próximos años y colaborar con socios clave de la industria para crear aplicaciones que exploten la velocidad cuántica de los sistemas.

IBM Q System One tiene una potencia de 20 qubits y, según la compañía, se podrá emplear para lograr sistemas globales de logística y cadenas de suministro más eficientes. Y

en finanzas, para encontrar nuevas formas de modelar los datos financieros y aislar los factores de riesgo globales clave para hacer mejores inversiones. Además, los nuevos sis-

temas tendrán aplicaciones en campos como el descubrimiento de nuevos medicamentos y materiales, ya que ayudarán a desentrañar la complejidad de las interacciones moleculares y químicas.

IBM Q System One está compuesto por una serie de componentes personalizados, que trabajan juntos para operar, como el programa de computación cuántica basado en la nube más avanzado. El sistema incluye el *hardware* Quantum, diseñado para ser estable y proporcionar qubits de alta calidad repetibles y predecibles.



El IBM 'Q System One' se presentó a principios de 2019, en Las Vegas.

Panorama



El presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Josep Maria Serena i Sender, acompañado de los cuatro consejeros que conforman el Pleno del CSN, Javier Dies, Elvira Romera, Pilar Lucio y Francisco Castejón, inauguró a finales de mayo la jornada anual de I+D del organismo regulador.

El Pleno apuesta por reforzar la I+D

El presidente del CSN, Josep Maria Serena i Sender, acompañado de los cuatro consejeros que conforman el Pleno del organismo regulador, Javier Dies, Elvira Romera, Pilar Lucio y Francisco Castejón, inauguraron el pasado 23 de mayo la jornada anual de I+D. Bajo el título ‘Una actividad estratégica para el CSN’, la sesión –retransmitida por primera vez vía *streaming*– repasó las principales actividades del organismo en I+D.

Así, Serena i Sender subrayó que durante su mandato se reforzarán los recursos humanos y económicos destinados a investigación y desarrollo y recordó que el actual Plan de I+D, aprobado para el periodo 2015-2020, se centra en dos ejes: potenciar los retornos de la investigación para introducir mejoras efectivas en la labor reguladora del CSN y reforzar el enfoque colaborativo y la búsqueda de sinergias.

Para esta nueva etapa, Serena i Sender trasladó su interés en que el Plan de I+D del organismo tenga en cuenta también

los efectos del cambio climático en la seguridad nuclear y en la protección radiológica, así como y el cambio organizativo en la implantación de la cultura de seguridad en los organismos reguladores.

Carlos Castela presentó la unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento y las principales actividades de I+D que el CSN llevó a cabo a lo largo de 2018. Se contó como experto internacional en la materia, con Raymond Furstenau, director de la Oficina de Investigación Reguladora Nuclear de la Comisión Reguladora Nuclear estadounidense (NRC, por sus siglas en inglés), quien compartió con los asistentes el trabajo que la NRC lleva a cabo y sus principales proyectos de investigación.

María José Rot, del Servicio de Radiofísica Hospitalaria del Hospital Universitario 12 de Octubre de Madrid, expuso los avances del proyecto ‘Análisis de riesgo mediante matrices de riesgo de tratamientos radioterapéuticos hipofraccionados’, y

los relativos al proyecto ‘Métodos avanzados en análisis termohidráulico y cálculo de incertidumbres’, fueron explicados por Albert Escrivá, de la Universidad Politécnica de Valencia, y Enrique Vela y Rafael Mendizábal, de la Subdirección de Ingeniería del CSN.

De la mano de Eduardo Gallego y Gonzalo Jiménez, de la Universidad Politécnica de Madrid, las actividades de la Cátedra del CSN Federico Goded, sobre librerías optimizadas con cuantificación de incertidumbres para cálculos realistas (BEPU) de reactores nucleares de agua ligera.

Durante la última parte de la jornada tomaron la palabra el presidente de la Plataforma CEIDEN y consejero del CSN, Javier Dies, para presentar las principales actividades de la Plataforma Tecnológica de Energía Nuclear de Fisión (CEIDEN), y a continuación las referentes a la Plataforma Nacional de I+D en Protección Radiológica (PEPRI), que fueron expuestas por su secretaria, Patricia Mayo.

El CSN impulsa con el Ministerio del Interior mejoras en la seguridad física de las centrales nucleares

La sede del Ministerio del Interior acogió el pasado 5 de junio una reunión de trabajo entre el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y el ministro en funciones, Fernando Grande-Marlaska, para abordar vías de colaboración entre las instituciones.

Entre los asuntos tratados destacó el desarrollo del Real Decreto 1086/2015 sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas, para avanzar con el despliegue de las Unidades de Respuesta de la Guardia Civil en las centrales nucleares. La implantación de este modelo de seguridad nuclear responde a la necesidad de hacer frente a las nuevas amenazas a la seguridad, mediante la prevención, neutraliza-



La sede del Ministerio del Interior acogió la reunión de trabajo entre el Pleno del CSN y el ministro en funciones, Grande-Marlaska.

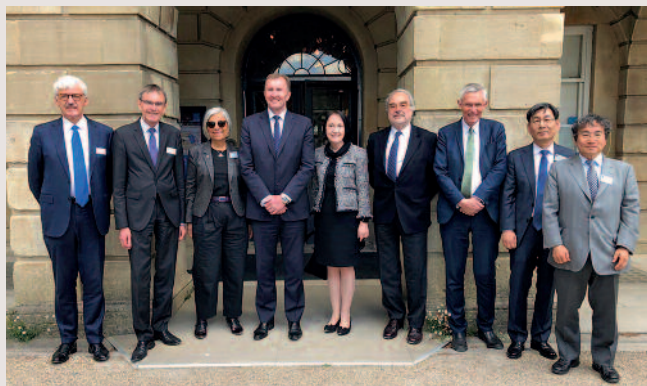
ción y respuesta ante supuestos de ataque o intrusión. También se trató en profundidad la revisión del Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN), así como de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil de Riesgos Radiológicos (DBRR).

Además del ministro Fernando Grande-Marlaska y el presidente del CSN, Josep María Serena i Sender, asistieron los consejeros Javier Dies, Pilar Lucio, Elvira Romero y Francisco Castejón, así como el secretario general, Manuel Rodríguez. Por parte de Interior, acompañaron al ministro el director general de Protección Civil y Emergencias, Alberto Herrera; el director del gabinete de Coordinación y Estudios, José Antonio Rodríguez, y mandos de la Guardia Civil.

La reunión sirvió para resaltar la buena relación y colaboración existente entre el CSN y el Ministerio del Interior, así como para reforzar la coordinación para la mejora continua de la seguridad exterior en los entornos nucleares.

El presidente destaca el compromiso y la apuesta por la gestión del conocimiento en la 44ª reunión de INRA

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear, encabezada por su presidente, Josep Maria Serena i Sender, participó en la 44ª reunión de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (INRA, por sus siglas en inglés) en Bath (Reino Unido), en la que se profundizó en el intercam-



La próxima reunión de INRA tendrá lugar en Viena, durante la Conferencia General del OIEA que se celebrará el próximo mes septiembre.

bio de información sobre las actuaciones reguladoras de los organismos de Canadá, Francia, Japón, Corea del Sur, Suecia, Inglaterra, Alemania, Estados Unidos y España.

Serena i Sender compartió con sus homólogos los principales trabajos de este último año, entre los que realizó un repaso del estado de las instalaciones nucleares y de las instalaciones radiactivas del ciclo del combustible nuclear, así como de las previsiones para el cierre de las centrales nucleares fijadas por el Gobierno de España. Igualmente, informó de que las centrales nucleares Almaraz y Vandellós II ya han solicitado la renovación de la autorización de explotación al Gobierno y que el CSN ya trabaja sobre su evaluación.

El presidente del regulador español destacó los buenos resultados de la misión conjunta IRRS-Artemis del OIEA a la que se sometió España en 2018 y resumió algunas de las actividades y proyectos en curso en el CSN. Entre ellas, destacó la apuesta del nuevo Pleno por la mejora del sistema de gestión del conocimiento del organismo regulador.

El CSN analiza sus principales líneas de actuación en la V Conferencia Europea de Seguridad Nuclear

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), encabezada por su presidente, Josep Maria Serena i Sender, participó en Bruselas en la Fifth European Nuclear Safety Conference (V Conferencia Europea de Seguridad Nuclear) organizada por el Grupo Europeo de Reguladores de Seguridad Nuclear (ENSREG) durante los días 6 y 7 de junio pasados. Esta edición de la conferencia estuvo presidida por el director general del regulador nuclear italiano (ISIN), Stefano Laporta. Acompañando al presidente del CSN asistieron el consejero, Javier Dies, que participó como ponente en una de las cuatro sesiones técnicas de las que se compone esta conferencia, aportando su experiencia tanto en el ámbito académico como en la gestión de conocimiento dentro del regulador. Técnicos del CSN formaron parte del comité de organización encargado de la preparación y co-

ordinación de la conferencia. La presencia española incluyó también a representantes de empresas del sector y sindicatos.

En la primera sesión, sobre la gestión del envejecimiento, se centraron en los resultados de la primera revisión temática de seguridad entre pares (*Topical Peer Review, TPR*) al amparo de la Directiva 2014/87/Euratom que revisa el marco europeo sobre seguridad nuclear y, en concreto, en las interpretaciones nacionales de las recomendaciones, las actividades futuras o el correcto tratamiento de la TPR como vehículo para mejorar la seguridad nuclear.

En la segunda, dedicada al desmantelamiento y la gestión de residuos radiactivos, se comentaron las lecciones aprendidas y los principales retos a los que se enfrentan los diferentes proyectos de desmantelamiento que se están abordando en la actualidad. Juan Luis Santiago, di-

rector de Operaciones de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), expuso la experiencia en España adquirida con el desmantelamiento de Zorita y el inicio de las tareas de desmantelamiento de Garoña.

En la tercera, focalizada en la estandarización de cadenas de suministro y obsolescencia de componentes, se puso de manifiesto la necesidad de sustitución y licenciamiento de nuevos sistemas y componentes que incluyen tecnología digital y la necesidad de incluir plenamente el concepto de ciberseguridad.

En la última sesión, centrada en la gestión y el mantenimiento del conocimiento, se destacaron los desafíos a los que se enfrenta el sector nuclear, tanto en la industria como en el regulador, por la pérdida de especialistas en las áreas más específicas del sector.

La Conferencia de ENSREG, con casi 200 participantes de diversos ámbitos de la sociedad y del sector nuclear de todo el mundo, permitió destacar la concienciación compartida por la seguridad nuclear y su mejora continua, así como la importancia de una debida comunicación, transparencia y participación pública en su desarrollo e implementación.

ENSREG es un grupo asesor de alto nivel, creado en 2007, para elevar recomendaciones al Consejo de la Unión Europea y al Parlamento Europeo sobre seguridad nuclear y gestión de residuos nucleares. El CSN participa en las reuniones del grupo, así como en varios grupos de trabajo de ENSREG dedicados a las áreas de seguridad nuclear, gestión de residuos radiactivos y combustible gastado, cooperación internacional y comunicación y transparencia del organismo regulador. ▀



El presidente del CSN, Josep Maria Serena i Sender, junto al consejero Javier Dies y Stefano Laporta, director general del regulador nuclear italiano (ISIN).



El CSN acogió en febrero la reunión anual del Comité de Sustancias Radiactivas (RSC, por sus siglas en inglés), perteneciente a la Convención encargada de la implementación del convenio Oslo-Paris (OSPAR).

Reunión en Madrid del comité de sustancias radiactivas de la Convención OSPAR

El Consejo de Seguridad Nuclear acogió en Madrid la reunión anual del Comité de Sustancias Radiactivas (RSC, por sus siglas en inglés), perteneciente a la Convención encargada de la implementación del Convenio de protección del medio marino del Atlántico Nordeste, conocido como convenio Oslo-Paris (OSPAR). En dicha reunión, España participó con una delegación formada por expertos del CSN y del Ministerio para la Transición Ecológica. El objetivo estratégico del RSC es prevenir la posible contaminación causada por las descargas y emisiones de sustancias radiactivas de las zonas marítimas del Atlántico Nordeste comprendidas el convenio OSPAR.

Para la celebración de esta reunión internacional, que contó con la participación de más de 40 expertos procedentes de diez países firmantes de la Convención y cinco observadores de organizaciones como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Asociación Mundial Nuclear (WNA, por sus siglas en inglés) y la Asociación Internacional de Productores de Gas y Petróleo (IOGP, también por sus siglas en inglés), se contó con la colaboración del Ministerio para la Transición Ecológica, representante español en la Comisión OSPAR, y del Ministerio de Fomento.

La sesión inaugural correspondió a María Jesús Muñoz, subdirectora de Protección Radiológica Ambiental del CSN, quien valoró los buenos resultados obtenidos por el trabajo de este comité a lo largo de los años en la prevención y control de la contaminación radiactiva en el Atlántico Nordeste.

En este encuentro, desarrollado entre los días 12 y 14 de febrero de 2019, los asistentes abordaron distintos asuntos entre los que cabe destacar la evaluación del cumplimiento de la estrategia para el período 2010-2020 y la definición de la nueva estrategia para 2020-2030.

En el marco de esta Convención, el CSN elabora y remite informes anuales con los datos sobre vertidos de efluentes radiactivos de las instalaciones nucleares y no nucleares y los datos resultantes de la vigilancia medioambiental en aguas de las costas españolas de la zona OSPAR.

La Convención OSPAR nació en París en 1992 con el objetivo de proteger el medioambiente marino del Atlántico del Nordeste. Este acuerdo, firmado y ratificado por Alemania, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Holanda, Islandia, Irlanda, Luxemburgo, Noruega, Portugal, Suecia, Suiza, Reino Unido y la Unión Europea, complementa convenios anteriores dedicados al control de vertidos al mar y contaminación marina.

Principales acuerdos del Pleno

Plan de Acción resultado de la Misión IRRS a España en 2018

La Secretaría General presentó a la consideración del Pleno la propuesta elaborada por la Unidad de Planificación, Evaluación y Calidad (UPEC), en colaboración con las unidades organizativas responsables, del Plan de Acción resultado de la Misión IRRS efectuada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a España en octubre de 2018.

Este Plan actualiza el inicial (resultado de la autoevaluación llevada a cabo para preparar la Misión), incorporando las recomendaciones y sugerencias identificadas durante la Misión IRRS de 2018.

El Plan de Acción inicial, que contenía 39 recomendaciones que se concretaban en 38 acciones, fue aprobado por el Pleno el 9 de mayo de 2018.

Este Plan, que recoge un total de 55 acciones, de las cuales 11 ya están cerradas y 44 permanecen abiertas, fue presentado y aprobado por el Pleno del CSN en su reunión del 20 de febrero de 2019.

Informe favorable a la modificación de implantación de un AIT en la CN de Cofrentes

El Pleno del CSN, en su reunión del pasado 8 de mayo, acordó informar favorablemente el informe sobre la solicitud de autorización de ejecución y montaje de la modificación para la implantación de un Almacén Temporal Individualizado (ATI) de la central nuclear de Cofrentes (Valencia).

La solicitud de modificación se presentó para resolver las necesidades de almacenamiento del combustible gastado en el emplazamiento central hasta que sea posible su traslado al Almacén Temporal Centralizado (ATC).

Aprobación de la propuesta de revisión 7C del Plan de Protección Física de la CN Santa María de Garoña

El Pleno del CSN, como resultado de las evaluaciones realizadas, informó favorablemente la solicitud de revisión de la propuesta 7C del Plan de Protección Física de la central nuclear de Santa María de Garoña (Burgos). En la propuesta se contempla una reducción del número de áreas vitales de las instalaciones en la situación de cese de operación en la que se encuentra la central.

Informe favorable a la revisión 4 del Plan de Emergencia Interior y el Reglamento de Funcionamiento en la CN José Cabrera

En su reunión del 8 de mayo, el Pleno del CSN estudió la solicitud de Enresa de Revisión 4 del Plan de Emergencia Interior aplicable al desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera (Guadalajara), así como el informe que efectuó en su día la Dirección Técnica de Protección Radiológica del CSN, y acordó informar favorablemente las modificaciones solicitadas.

Previamente, en el Pleno de 20 de marzo, en un anexo, se especificaba que Enresa habrá de notificar a la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio para la Transición Ecológica y al Consejo de Seguridad Nuclear, con una antelación de 15 días, el paso a modo B de funcionamiento aplicable al desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera.

Convenios de colaboración para la puesta en marcha de proyectos de I+D

El Pleno del CSN aprobó dos convenios de colaboración para el desarrollo de dos

proyectos de I+D, uno con el Laboratori Radiologia Ambiental - Universitat de Barcelona - Fundació Bosch i Gimpera para la puesta en marcha del proyecto de I+D "Desarrollo de una aplicación para la deconvolución de espectros de centelleo líquido para la determinación rápida y simultánea de emisores alfa y beta", y otro con la Universidad Politécnica de Cataluña y la Fundación para la Investigación Biomédica del Hospital Clínico San Carlos para el desarrollo del proyecto de I+D "Estimaciones de dosis ocupacionales en cristalino en instalaciones sanitarias y de investigación. Propuestas de vigilancia radiológica individual"..

Acuerdo de Entendimiento entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Agencia Estatal de Administración Tributaria, en materia de detección de materiales nucleares y radiactivos fuera del control regulador y reforzamiento de la cadena logística

El CSN y la Agencia Estatal de Administración Tributaria ya disponen de instrumentos de colaboración mutua tales como el protocolo de colaboración en caso de detección de movimiento inadvertido o tráfico ilícito de material radiactivo en puertos de interés general (Protocolo MEGAPORT). Desde su firma, 15 de junio de 2015, se han producido numerosas actividades conjuntas que recomiendan suscribir un Acuerdo de Entendimiento entre ambas instituciones, el cual además incluirá aspectos bilaterales que no se vieron reflejados en el Protocolo MEGAPORT por ser un acuerdo de ámbito multiinstitucional.

Una vez estudiada la propuesta, el Pleno acordó su aprobación en los términos propuestos.

Toda la información de la misión combinada, en la web del CSN

La web del organismo regulador ya cuenta con un apartado específico en el que se recoge toda la información sobre la misión conjunta IRRS-Artemis del OIEA a la que se sometió España en 2018, así como la información referente

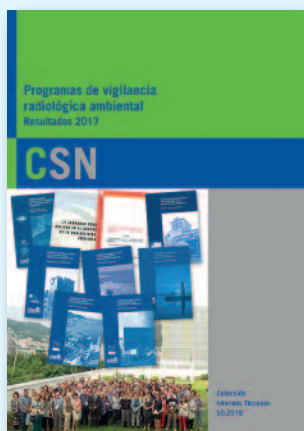
al Plan de Acción Nacional diseñado para implementar los hallazgos de la misma, que ya se ha iniciado. Además, se puede descargar un completo monográfico de la revista ALFA dedicado a toda la actividad desarrollada.

LA MISIÓN COMBINADA, AL DETALLE. En este apartado de la web del CSN se puede descargar toda la información de la misión combinada.

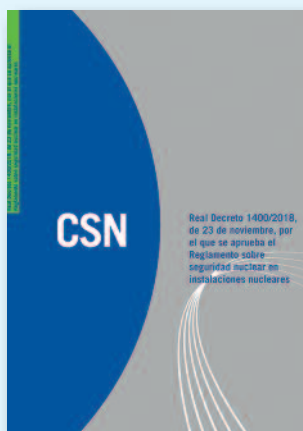
MONOGRÁFICO DE LA REVISTA 'ALFA': La revista ALFA, editada por el Consejo de Seguridad Nuclear, dedicó un número monográfico a las actividades realizadas con motivo de la misión conjunta.

Especial sobre las misiones internacionales IRRS-ARTEMIS

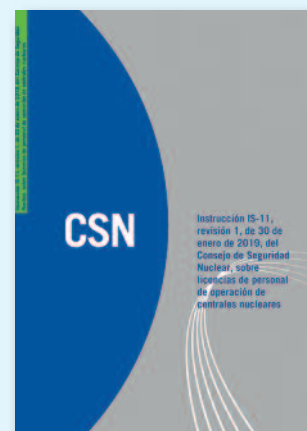
Publicaciones



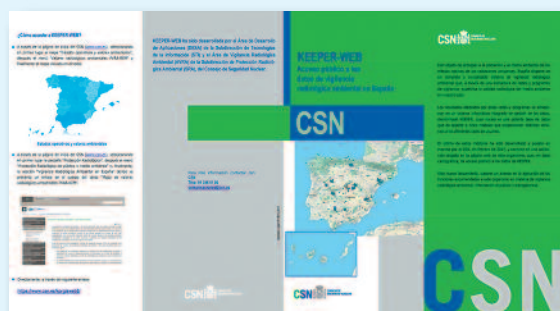
**Programas de vigilancia
radiológica ambiental**
Resultados 2017



**Real Decreto 1400/2018
de 23 de noviembre, por el que se aprueba
el Reglamento sobre seguridad nuclear en
instalaciones nucleares**



**Instrucción IS-11, revisión 1, de 30 de
enero de 2019, del Consejo de Seguridad
Nuclear, sobre licencias de personal
de operación de centrales nucleares**



KEPPER-WEB

Acceso público a los datos de vigilancia radiológica ambiental en España



KEPPER-WEB

Public access to the data of the environmental radiation monitoring system in Spain

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

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

06 The first floating nuclear power plant for civil use gets under way

Russia is putting the final touches to the first floating nuclear power plant, whose reactor successfully passed all its tests in late April of this year. In a country with cities in some of the most inhospitable regions of the planet, this type of small-sized facilities would offer a more flexible alternative to the construction of other types of electricity-generating plants. The ship, named Akademik Lomonosov, was built between 2007 and 2018 and carries two 35 MW reactors.

20 Eduardo Torroja, a genius beyond the drawing board

Engineering occupies a somewhat peculiar position among scientific disciplines. Its twinning with architecture tends to blur the concept in popular thinking, with one area becoming confused with the other, when in fact many fields of engineering have nothing to do with the design and building of structures. Major works of civil engineering make up an open-air museum that stretches across a city or country. An example is the Tempul aqueduct in Jerez de la Frontera, which is a point of reference for the public at large due to its being the first major work conceived by Eduardo Torroja.

26 Batteries: the challenge lies in quick charging

Batteries of greater capacity, lower weight and shorter charging times have paved the way for the increasing popularity of electrical vehicles. However, they continue to suffer important problems relating to insufficient autonomy, extended charging times and higher production costs than conventional cars. To a large extent these problems are the result of the electricity accumulators, which are still unable to provide the performance required to complete with traditional combustion engines.

44 The precursors of the atom

Following a keen but misguided start and a period of neglect and lack of interest that culminated in the Civil War, Spain was able to recover years lost in the nuclear science race thanks to a fortunate series of international coincidences and the valuable role played by a number of people who were only incidentally linked to the scientific world.

RADIOGRAPHY

52 What are piezometers?

INTERVIEW

14 Carlos Alejaldre, director of the Centre for Energy-Related and Environmental Research (CIEMAT)

The lengthy and international scientific career of the physicist Carlos Alejaldre (Zaragoza, 1952) is closely linked to research into nuclear fusion and to the Centre for Energy-Related and Environmental Research, where in the 1980's he led the development, construction and scientific exploitation of an experimental fusion reactor, the TJII, which continues to operate today.

TECHNICAL ARTICLES

36 Proton therapy facilities. Radiological protection requirements

Proton therapy, which will be a reality in our country before the end of the year, is an advanced, safe and effective alternative in the struggle against cancer. The system is a breakthrough in the field of radiation oncology and uses a beam of protons to "sculpt tumours with radiation without the need to damage healthy tissue".

54 The management of combustible gases at Spanish nuclear power plants by means of passive autocatalytic recombiners

Following the accident at the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant (Japan), the European Union countries subjected their plants to a series of 'stress tests' in order to check their capacity to address situations similar to those that had occurred in Japan. As a result of these tests, the Spanish nuclear power plants identified various areas for improvement, particularly significant among which was the installation of passive autocatalytic (hydrogen) recombiners (PAR).

- 61 Chain reaction
- 64 Panorama
- 68 Plenary Agreements
- 69 csn.es
- 70 Publications



Súmate a los 135.000

Desde su inauguración en 1998, los 135.000 visitantes del Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear han tenido ocasión de aproximarse al conocimiento sobre las radiaciones ionizantes, sus usos, sus riesgos y los controles y la protección que son necesarios para garantizar su utilización fiable, en la cual el CSN –como organismo encargado de la seguridad nuclear y la protección radiológica– juega un papel muy importante.

En la vida diaria utilizamos las radiaciones con una enorme frecuencia, tanto en relación con la salud y la medicina –en diagnóstico y en terapia– como también en la industria y en la investigación. A través de un recorrido guiado por los 29 módulos, se pueden conocer con detalle estos aspectos relacionados con las radiaciones. Consigue más información en www.csn.es/index.php/es/centro-informacion o pide cita en centroinformacion@csn.es. Súmate a los 135.000.