

Ensayos no destructivos

Una herramienta de creciente relevancia
en el control de la seguridad



El CSN por dentro: la Subdirección de Instalaciones Nucleares, indispensable para la seguridad de las plantas

Cristina Narbona, consejera del CSN:
"Fukushima ha propiciado medidas adicionales de seguridad, que todas las centrales nucleares están incorporando"

Diez años de cátedras del CSN: la seguridad nuclear se abre un hueco en las universidades



Súmate a los 110.000

Desde su inauguración en 1998, los 110.000 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 110.000.

Diez años de cátedras

Este año 2015 ha visto pasar, entre otros hitos, el décimo aniversario de la creación de las cátedras del Consejo de Seguridad Nuclear. Enfocadas a la formación y la investigación en seguridad nuclear, en la actualidad son cuatro los acuerdos firmados por el CSN con universidades de Barcelona, Madrid y Valencia, con los nombres Juan Manuel Kindelán, Federico Goded, Argos y Vicente Serradell. En las páginas de *Alfa* celebramos este aniversario con un repaso a sus contenidos y evolución.

Además, en este nuevo número nos preguntamos cómo se pueden inspeccionar las estructuras y los componentes de una central nuclear si se trata, en su mayoría, de localizaciones estancas. La respuesta se puede encontrar en un reportaje dedicado a los ensayos no destructivos (END), pruebas que se aplican para garantizar la calidad del proceso de fabricación de esas estructuras y componentes y, por supuesto, para conocer su estado mientras están en servicio.

Los métodos de END se clasifican habitualmente en función del tipo de característica que pretenda ser detectada, para lo cual se pueden emplear diversos procedimientos, como la inspección visual, las partículas magnéticas, la radiografía, los líquidos penetrantes, los ultrasonidos y las corrientes inducidas.

Hablamos, además, de un elemento que en la década de los años sesenta se pre-

sentó como el combustible nuclear del futuro: el torio. Sin embargo, el debate que arrancó el siglo pasado sobre su posible utilización en reactores nucleares todavía no se ha cerrado, y parece que va para largo.

Un asunto que también genera intercambio de opiniones es la percepción del riesgo. En *Alfa* 28 analizamos todos los factores que intervienen a la hora de que

estar siempre preparados para evitar que suceda algo y, si sucede, saber cómo gestionarlo”.

La sección *CSN por dentro* está dedicada en este número a la Subdirección de Centrales Nucleares, un área indispensable en la supervisión del funcionamiento seguro de las instalaciones nucleares y transporte de material radiactivo por nuestro país.

Asimismo, recorremos el recién renovado Hospital Universitario Central de Asturias, HUCA, que dispone de tres aceleradores lineales de última generación para tratamientos oncológicos en radioterapia, lo que convierte a este centro en una referencia tecnológica sanitaria.

También en el ámbito médico, hablamos del Proyecto DOPOES, una investigación de tres años de duración sobre los procedimientos de radiodiagnóstico utilizados en los centros sanitarios españoles, su frecuencia y las dosis recibidas por los pacientes, que ha sido realizada y por la Universidad de Málaga, bajo la supervisión del CSN.

Por último, aunque no por ello menos importante, mostramos las novedades que se han incorporado al Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear. No obstante, desde estas páginas también les invitamos a que vengan a conocerlas en persona y, si no pueden, a realizar la visita virtual desde nuestra nueva web. 

En la actualidad son cuatro los acuerdos firmados por el CSN con universidades de Barcelona, Madrid y Valencia

dos personas puedan defender posiciones completamente opuestas al analizar los mismo datos.

Las páginas de la entrevista están dedicadas a la consejera Cristina Narbona Ruiz, quien, además de hacer un repaso a las funciones del CSN, realiza una reflexión sobre la necesidad de una buena preparación ante situaciones inesperadas: “El riesgo cero no existe, luego hemos de

ALFA

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 28

Comité Editorial

Fernando Martí Scharfhausen
Antonio Munuera Bassols
Fernanda Sánchez Ojanguren
Enrique García Fresneda
Ángel Laso D'Lom
Manuel Toharia Cortés
Ignacio Fernández Bayo

Comité de Redacción

Ángel Laso D'Lom
Concepción Muro de Zaro

Natalia Muñoz Martínez

Antonio Gea Malpica
Manuel Aparicio Peña
Ignacio Fernández Bayo

Edición y distribución

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

Coordinación editorial

Divulga S. L.
Diana, 16 - 1º C
28022 Madrid

Fotografías

CSN, Divulga, Javier Fernández,
iStockphoto y Depositphotos

Impresión

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

Fotografías de portada

Tecnatom, CSN

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



4 Las paradójicas raíces del miedo

¿Por qué nos asustamos de los viajes en avión y no cuando subimos a un coche, mucho más peligroso? ¿Por qué la gente se juega la vida en deportes de aventura y teme a los inocuos alimentos de origen transgénico? El caso de la seguridad nuclear y radiológica ofrece una oportunidad idónea para examinar los factores psicológicos, culturales y sociales que influyen en nuestra valoración de los peligros.

20 La seguridad nuclear se abre un hueco en las universidades

El programa de cátedras del CSN patrocina la formación y especialización de profesionales en ingeniería nuclear. Creado hace diez años, actualmente patrocina ya cuatro acuerdos con las universidades politécnicas de Barcelona, Madrid y Valencia.

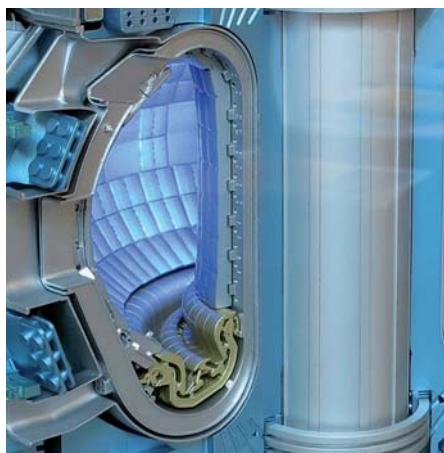


25 La renovación de un clásico

La información pública es una de las tareas encomendadas al CSN, como refleja su Ley de Creación. Dentro del conjunto de actividades que desarrolla para ello destaca el Centro de Información y su exposición permanente de carácter divulgativo. Tras superar los 100.000 visitantes, ha renovado ahora una parte de sus módulos.

44 En la vanguardia de la tecnología

La construcción de la nueva sede del Hospital Universitario Central de Asturias ha permitido dotar del más moderno equipamiento a sus servicios de radioterapia y radiodiagnóstico. Desde su inauguración, en junio del año pasado, miles de pacientes se han beneficiado ya de su puntera tecnología.



54 La fábrica de los supermateriales

Europa y Japón construyen una instalación donde se probarán los materiales que permitirán equipar los futuros reactores de fusión nuclear. Situada en Rokkasho, al norte del país nipón, permitirá solucionar uno de los problemas clave para hacer realidad esta tecnología energética.

62 La promesa del torio

En los años sesenta, Estados Unidos construyó el primer reactor experimental que empleaba torio como combustible, en lugar de uranio o plutonio, una tecnología que prometía ser más segura, limpia y eficiente. Medio siglo después, esta alternativa sigue en fase experimental y no parece probable que llegue a pasar de ahí.

EL CSN POR DENTRO

9 Subdirección de Instalaciones Nucleares

Dependiente de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear, esta subdirección es la encargada de la supervisión de las centrales nucleares operativas en España y de la fábrica de combustible de Juzbado. También se ocupa del transporte de materiales nucleares y radiactivos.

30 RADIOGRAFÍA

Gestión de residuos radiactivos líquidos generados en medicina nuclear.

ENTREVISTA

32 Cristina Narbona Ruiz, consejera del CSN

“Fukushima ha propiciado medidas adicionales de seguridad, que todas las centrales nucleares están incorporando”.

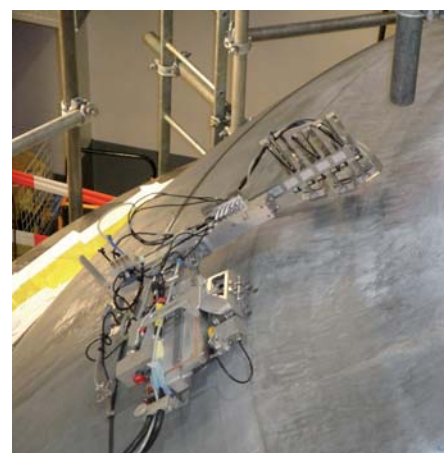
ARTÍCULOS TÉCNICOS

12 Estimación de las dosis a las poblaciones en España como consecuencia del radiodiagnóstico médico

El Proyecto DOPOES, fruto de un acuerdo entre el CSN y la Universidad de Málaga, ha realizado una prospección sobre los procedimientos de radiodiagnóstico en España, su frecuencia y las dosis recibidas por los pacientes, durante 35 meses. Este artículo presenta sus resultados.

38 Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos se han convertido en una herramienta de creciente importancia para realizar análisis de calidad y de seguridad en numerosos sectores industriales, como el nuclear, el aeronáutico, el petroquímico y el naval, ya que permiten garantizar la calidad de un producto o verificar su estado en servicio.



50 **Reacción en cadena**

66 **Panorama**

70 **Acuerdos del Pleno**

71 **csn.es**

72 **Publicaciones**



El riesgo de alguna prácticas deportivas extremas no desalienta a muchos, que incluso lo perciben como un aliciente.

Un abismo media entre la percepción de riesgo de la gente y los cálculos de los expertos

Las paradójicas raíces del miedo

¿Por qué nos asustamos de los viajes en avión y nos subimos alegremente a un coche, muchísimo más peligroso? ¿Por qué la gente se juega la vida en deportes de aventura y teme a los inocuos alimentos de origen transgénico? ¿Por qué la misma persona puede defender la minería del carbón y a la vez protestar

contra el *fracking* contaminante? El caso de la seguridad radiológica ofrece una oportunidad idónea para examinar los factores psicológicos, culturales y sociales que influyen y complejizan nuestra valoración de los peligros. ■ Texto: **Pablo Francescutti** | periodista científico y profesor de la Universidad Rey Juan Carlos ■

Los datos cantan: en enero, el Pew Institute encontró que el 51 % de los estadounidenses adultos se opone a construir más centrales nucleares; en agosto, las encuestas revelaron que en Japón la mayoría se opone a la reapertura de las plantas cerradas tras el desastre de Fukushima. Por estos pagos las cosas no pintan distintas: el Eurobarómetro de 2010 (antes de ese accidente) indicó que los españoles figuran entre los europeos que ven en la energía nuclear más riesgos que ventajas (así lo expresó el 61 % de entrevistados, por encima del 55 % de opiniones negativas registrado en 2007). Además, el 50 % creía que los incidentes nucleares han sido subestimados, frente a un 30 % que opinaba que habían sido exagerados. Al año siguiente, el Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS) señaló que la construcción de nuevas centrales le inspira al 64,5 % de los españoles mucho o bastante temor. Y no se trata de impresiones sin calado político: en Estados Unidos, Barack Obama paralizó el depósito de residuos radiactivos previsto en Yucca Mountain; en Alemania, Angela Merkel dispuso el cierre de las centrales para 2022; y en España, el almacén de Villar de Cañas se halla en el aire.

Llamativamente, el número de muertes debidas a la contaminación causada por el carbón, por ejemplo, es muy superior al ocasionado por la fisión del átomo. Pese a ello, ningún combustible fósil suscita el rechazo visceral generado por aquella. En España los empleos de la industria nuclear jamás han tenido el apoyo social recibido por la minería. Sin duda, siniestros como el de Fukushima explican que el repudio crezca en Japón; pero la oposición se repite en países que no han vivido desastres semejantes. Tales hechos ponen de relieve las persistentes actitudes negativas ante las radiaciones.

¿Cómo se explica la tenaz resistencia? No faltan razones históricas. Es un tópico decir que los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki proyectaron una sombra siniestra sobre el poder del átomo desde sus albores, pero la sombra tendría que haberse disipado tras el final de la guerra fría y el parón de la carrera armamentista. Debe haber, por consiguiente, otras variables en juego.

¿Objetivo, subjetivo o lo contrario?

Las encuestas identifican un sector de la población refractario al *miedo nuclear*: los científicos y tecnólogos. No casualmen-

te, este colectivo comulga con las concepciones objetivistas según las cuales los riesgos poseen existencia propia y, por tanto, pueden ser estimados y, en consecuencia, prevenidos. Práctica, por tanto, el cálculo objetivo de riesgos y confía en la capacidad humana para preverlos y controlarlos. Establece una separación radical entre el riesgo (objetivo) y su percepción (subjetiva); y, a menudo, imputa las percepciones negativas a la falta de información o a prejuicios.

Sin embargo, los críticos señalan que esa clase de cálculos sirve con riesgos conocidos, no así frente a interacciones o comportamientos inesperados de materiales o procesos (las precauciones en la fabricación de harinas cárnicas de nada valieron frente a la irrupción de un factor ignoto, el príón, lo que diseminó el mal de las vacas locas). A su modo de ver, la cuestión clave es la siguiente: ¿vale la pena que, como sociedad, corramos este riesgo? Y la respuesta dependerá de los valores en liza —¿cómo queremos vivir?—, algo que ningún análisis objetivo podrá dilucidar.

Otros enfoques niegan una separación tajante entre el riesgo y su percepción, pues sostienen que esta for-



Muchos ciudadanos sienten temor a vivir en el entorno de una central nuclear y no perciben el grave riesgo que conlleva el hábito de fumar.



Mucha gente no tiene inconveniente en vivir en zonas graníticas, donde se genera gas radón radiactivo natural, y siente temor a hacerlo cerca de una central nuclear.

ma parte esencial de la definición del riesgo. Se sigue de allí que, en la medida en que las percepciones dependen del contexto social y cultural, los riesgos están cultural y socialmente determinados. Estas determinaciones, concluyen, brillan por su ausencia en el análisis objetivo.

Sesgos culturales y sociales

Toda cultura, explicaba la antropóloga Mary Douglas, se organiza con arreglo a un sistema de clasificaciones estructurado en torno a una gran división: de un lado las cosas “puras” (alimentos, remedios...); del otro, las “impuras” (venenos, excrementos...). El orden cultural se halla a salvo mientras la división se respeta; cuando se mezcla lo que debe mantenerse separado, se desestabiliza. En el mundo moderno, apuntó Douglas, la dialéctica puro/impuro modula la intuición del riesgo.

La energía nuclear lo ejemplifica: la campaña de Átomos por la Paz se esforzó por asociarla a imágenes de pureza (la luz, la blancura); pero un giro radical en la opinión pública acabó encasillándola con las cosas que enferman, matan o ensucian (la contaminación de la leche, el

alimento más “sagrado”, a resultas de la lluvia radiactiva producida por las pruebas de bombas H en los años sesenta, ayudó a inclinar la balanza en esa dirección). El tabú que cayó sobre ella ha sido tan fuerte que se extendió a las radiaciones no ionizantes de la telefonía móvil y los tendidos de alta tensión.

A ello se suman factores condicionantes como el género; se sabe que las mujeres tienen una visión del riesgo más acusada que los hombres (a la hora de escoger un antibiótico infantil, ellas se pre-

ocupan más por sus contraindicaciones, por ejemplo) y esto ocurre aun en colectivos bien informados como el científico. El sesgo se atribuye a la mejor posición y a la autoconfianza del sexo masculino (la prueba en contrario la pone Suecia: allí donde la igualdad sexual es mayor no se aprecian diferencias de géneros en este punto). También interviene la edad: los ancianos suelen ser más aprensivos que los jóvenes, por lo común más temerarios. Luego están los factores psicológicos: tememos menos a



Andrés García, ex director del Centro de Investigación Social de Situaciones de Emergencia.



Ulrich Beck, sociólogo alemán, autor del concepto de "sociedad del riesgo", fallecido en enero de este año.

los riesgos cuando creemos tener algún control sobre ellos o los asumimos voluntariamente. Lo explicitó un trabajo del psicólogo Paul Slovic centrado en un pueblo estadounidense que toleraba altos niveles de radón, un gas radiactivo que emana del subsuelo, y se oponía a la apertura de un depósito de residuos nucleares: la diferencia no radicaba en el grado de peligro, sino en que el radón tenía origen natural y al depósito se lo veía como una imposición.

Y todo esto contra el fondo de la "sociedad del riesgo". Con estos términos el teórico alemán Ulrich Beck caracterizó a las sociedades postindustriales, en donde los efectos adversos del progreso (contaminación, accidentes...) se acumulan y se pierde la confianza en la ciencia y en la técnica, y en sus responsables, científicos y tecnólogos. Hay una proliferación exponencial de riesgos imprevisibles, incontrolables, globales, inasegurables. Los controles fallan y el riesgo residual se torna la rendija por la que se cuelan los monstruos. Los riesgos nacidos de la abundancia eclipsan a los asociados a la escasez (desempleo, enfermedad, hambruna...) y en reacción surgen movimientos de ecologistas y consumido-

res, y se adoptan medidas como el principio de precaución.

El riesgo nuclear es un caso paradigmático de la sociedad del riesgo (Beck afirma que esta fue parida por el hongo de Hiroshima). "Alude a una energía incolora, insabora y eterna, cuyos efectos nefastos pueden transmitirse a nuestros descendientes, como las antiguas maldiciones", detalla Andrés García, exdirector del Centro de Investigación Social de Situaciones de Emergencia, de la Dirección General de Protección Civil. "Como no es perceptible a través de los sentidos, a diferencia de un incendio o una inundación, parece difícil de controlar, y para lidiar con ella necesitamos intermediarios expertos, tanto a favor como en contra", añade. Y si se desconfía de los intermediarios, las percepciones pueden abrir una crisis: así sucedió en Fukushima; pese a que nadie murió a resultas de las radiaciones, el recuerdo de Hiroshima y la mendacidad de los gestores de la central provocaron un escándalo mucho mayor que el terremoto previo, que se cobró 18.000 vidas.

Beck aplica la categoría de sociedad de riesgo a las naciones desarrolladas.

Esto explicaría que, en los países que llegaron con retraso a la Revolución industrial y aún no han notado sus consecuencias malsanas, sigan apostando por un desarrollo basado en combustibles *sucios*, deforestación, vertidos incontrolados... No todos coinciden con su diagnóstico —algunos sostienen que el primer mundo padece una irracional hipersensibilidad al peligro—; pero existe acuerdo en que el riesgo ha ganado una dinámica inédita que las autoridades y los gestores no pueden soslayar.

Queda claro que la toma de decisiones en esta materia es cualquier cosa menos una fría valoración de costes y beneficios. Se crea de ese modo una situación en la que "muchos estamos más temerosos de algunos riesgos —el mercurio o los alimentos con ingredientes transgénicos— de lo que las pruebas justifican. Y muchos no estamos tan preocupados como deberíamos de peligros graves como el cambio climático, la acidificación de los océanos o contaminaciones puntuales", reflexiona David Ropjek, experto en comunicación ambiental de la Universidad de Harvard.

Miedo al átomo y terror al paro

¿Qué sucede con la percepción del riesgo radiológico en España? García observa que aquí, al igual que en otras latitudes, las actitudes se ajustan a un modelo de capas de cebolla: "cuanto más cerca se halla una persona del núcleo, es decir de la instalación nuclear, menos importancia da al riesgo —con frecuencia es un empleado y se beneficia de ella—; cuanto más lejos se sitúa, mayor relevancia le otorga —no casualmente, estos individuos no sacan una ventaja concreta de la instalación—".

A ese respecto, resulta instructivo el contraste entre los estudios efectuados por el CIS en los años 2011 y 2013. El primero —ya mencionado— se llevó a cabo poco después de Fukushima, y, a

Los españoles y la seguridad radiológica

El estudio demoscópico más reciente sobre la percepción de la seguridad radiológica que tienen los españoles se hizo público en julio pasado. Se trata de un estudio encargado por el CSN, a petición de su Comité Asesor, basado en 3.005 encuestas telefónicas y en las valoraciones de un panel Delphi con expertos de ayuntamientos, empresas, asociaciones y universidades.

Entre sus conclusiones, disponibles en la web del CSN, destaca el dato de que los ciudadanos que consideran que no es seguro residir en el entorno de una central nuclear (un 45 % del total) superan a quienes piensan que es “bastante” o “totalmente seguro” (33,8 %). El 42,9 % cree que la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas se halla bastante o totalmente garantizada, frente al 24,6 % que piensa lo contrario.

En materia informativa se señalan deficiencias. El 90,3 % de los consultados considera que los españoles no están adecuadamente informados sobre seguridad nuclear y protección radiológica, y el 45,7 % afirma tener “ninguna” o “poca” confianza en la información disponible, frente al 20,7 % que confía “mucho” y “bastante”. El 69,7 % opina que dicha información es una cuestión de interés para los ciudadanos. Más del 76 % considera que las noticias en los medios de comunicación son el canal adecuado para difundir información sobre tales asuntos.

Llamativamente, quienes viven en las zonas de influencia de las instalaciones nucleares manifiestan “un nivel de desconfianza prácticamente igual al de la población general”, aunque dicen estar mejor informados que quienes viven en otras regiones,

En resumen: persiste la percepción de las centrales como algo inseguro y se constata la existencia de un déficit informativo que, en opinión de los entrevistados, debería solventarse a través de los medios de comunicación. ▶

juicio del sociólogo Javier Callejo, que supervisó ambos, esto debe haber influido en el rechazo a la energía nuclear manifiesto en las respuestas. El segundo, realizado dos años más tarde, era cualitativo; en vez de limitarse a expresar su acuerdo o desacuerdo con las cuestiones planteadas, como en el anterior, los entrevistados debían articular sus argumentos. Se observó que quienes trabajaban en el polo industrial de Tarragona justificaban el riesgo nuclear en mayor medida que quienes vivían en otras regiones. El resultado es congruente con una comparativa belga de las percepciones de empleados expuestos a la radiación con las opiniones de

ciudadanos que no lo estaban: los primeros veían en las radiografías un riesgo superior al trabajo en instalaciones atómicas, los segundos minimizaban los rayos X frente a la posibilidad de un siniestro nuclear.

Más sorprendente fue el hallazgo de que la población general española no se mostraba alarmada. Callejo resume la opinión media del siguiente modo: “A nadie le gusta estar al lado de esas centrales, pero sus beneficios son obvios”. Expresadas al calor de la crisis económica, las opiniones recogidas en la investigación elevaban el desempleo al rango de riesgo superior.

¿Cómo casan los dos estudios? Para Callejo, el primero recoge sobre todo ads-

cripciones y percepciones; puesto en la tesitura de posicionarse sobre un tema propuesto, el interpelado responde en función de su identidad ideológica; sabe que si es de izquierda, le toca oponerse a la expansión de la energía nuclear; si es de derecha, que lo suyo es apoyarla. El segundo saca a la luz sus pareceres personales más profundos. “Descubrimos que el español medio no quiere entrar en ese debate. Sacando las minorías convencidas, no detectamos discursos elaborados. No es un asunto prioritario, y eso salta a la vista en el debate político”. En efecto, sacando el recurrente tópico del almacén de residuos, lo nuclear ha tenido un perfil bajo en la agenda pública de los últimos años; incluso también para sectores críticos, como los *indignados*, el tema no figuraba en sus quejas y demandas.

El cuadro se vuelve más complejo. En España el rechazo a la energía nuclear coexiste con la ansiedad por las penurias económicas y, si se toman por separado, se puede concluir erróneamente que los españoles no temen a las radiaciones, o, al contrario, que les aterrorizan. Más atinado parece pensar que tales disposiciones se combinan y, en algunas circunstancias, las primeras llegan a primar sobre las segundas. En cualquier caso, que las percepciones deben tenerse en cuenta lo reconocen hasta los partidarios del cálculo objetivo. Y mientras estudiamos la intrincada índole del riesgo, una legión de expertos en comunicación se aboca a gestionar percepciones muy difíciles de modificar. “Puede que ese proceso no siempre conduzca a una alineación exacta de las estimaciones técnicas con las percepciones públicas”, se dice en el documento de la Comisión Europea sobre percepción del riesgo, “pero las experiencias sugieren que la pericia científica, los intereses de las partes y las percepciones públicas pueden reconciliarse si se hace un esfuerzo serio por integrarlas”. ©



Los integrantes de la Subdirección de Instalaciones Nucleares, que controla el funcionamiento de las centrales nucleares y la fábrica de combustible de Juzbado.

La Subdirección de Instalaciones Nucleares, indispensable para la seguridad de las plantas

Dentro de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear del CSN se encuadra la Subdirección de Instalaciones Nucleares, encargada de la supervisión de las centrales nucleares operativas en España y la fábrica de elementos combustibles de Juzbado. Además, esta unidad también se encarga de controlar

el transporte de sustancias nucleares y materiales radiactivos y de la experiencia operativa de estas plantas. Un trabajo que vela por la seguridad y garantiza el correcto funcionamiento de estas instalaciones. ■ Texto: **Adriana Scialdone García** | Área de Comunicación del CSN ■

Actualmente hay cinco centrales nucleares operativas en España, dos de ellas con dos reactores cada una (Almaraz y Ascó), por lo que suman 7 reactores en toda la península, además de la central nuclear de Santa María de Garroña, que se encuentra parada. Estas instalaciones necesitan estar controladas, y la Subdirección de Instalaciones Nucleares (SCN), perteneciente a la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear (DTSN), se encarga de gestionar sus actividades de licenciamiento y supervisión. Además, se encarga de la fábrica de elementos combustibles de Juzbado y de los transportes de sustancias nucleares y materiales radiactivos. Cumple pues con una parte deter-

minante en el trabajo del organismo regulador a la hora de garantizar que el funcionamiento de estas instalaciones se ajuste a los criterios de seguridad establecidos por el CSN.

Asimismo, sus técnicos participan en los Comités de Información de las centrales nucleares, una parte importante de la comunicación a los ciudadanos desde el regulador y las instalaciones reguladas. Su papel es también esencial en el área de emergencias, como participante del Grupo de Información, que apoya al director de Operaciones de Emergencias (DOE) en la comunicación a la sociedad de estas situaciones. Una parte importante de su labor la realizan los

inspectores residentes (técnicos pertenecientes a la SCN que supervisan *in situ* el funcionamiento de la planta).

Los jefes de proyecto

Cada planta tiene sus propias características, por lo que es necesario contar siempre con un técnico del CSN que conozca perfectamente la instalación y su funcionamiento, todo lo que ocurre en ella y el estado de las actividades en curso, para que pueda informar al organismo regulador. Ese es el jefe de proyecto, uno por cada instalación, que se encarga de coordinar todas las actividades de supervisión y licenciamiento de su planta.

“La actividad del regulador es imprescindible y debemos desarrollar nuestro trabajo de la forma más eficaz y eficiente”

Manuel Rodríguez Martí es funcionario de la Escala Superior del Cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica en el Consejo de Seguridad Nuclear. Antes de ocupar su actual cargo, subdirector de Instalaciones Nucleares, ha sido subdirector general de Protección Radiológica Operacional y jefe del Gabinete de la Dirección Técnica.

PREGUNTA: Desde hace dos años ocupa el puesto de subdirector de Instalaciones Nucleares tras una larga trayectoria dentro del CSN ¿cómo se siente trabajando dentro del regulador español en puestos de tanta responsabilidad?

RESPUESTA: Desde que entré en el Consejo de Seguridad Nuclear, hace ya muchos años, he tenido la suerte, en las diferentes actividades que he ido desempeñando, de haber encontrado en todos los niveles grupos de personas de gran profesionalidad, siempre con ganas de aprender y mejorar y con extraordinario ambiente de relaciones personales. Esto lógicamente ha dado como resultado que me haya sentido muy a gusto y en una condición de ánimo inmejorable para abordar las tareas asignadas, con sus lógicas dificultades y desafíos.

Al ocupar puestos de mayor responsabilidad, ese sentimiento se ha mantenido aunque, lógicamente, ha aumentado la exigencia autoimpuesta de contribuir a que el organismo y las personas que trabajamos en él mantengamos ese carácter y esas actitudes.

En cuanto al trabajo como regulador, mi sentimiento es que se trata de una actividad imprescindible que tenemos que desarrollar de la forma más eficaz y eficiente que podamos. La experiencia demuestra que el ejercicio inadecuado de la función reguladora puede tener resultados inaceptables para la sociedad a la que representamos.

P: Ustedes se encuentran dentro de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear ¿cuál es su función dentro de esta Dirección?

R: La Subdirección de Instalaciones Nucleares tiene una doble función, por un lado se encarga del seguimiento y la supervisión del licenciamiento y el funcionamiento de las instalaciones y, por otro, se encarga de preparar la documentación técnica que sustenta las propuestas que el director técnico eleva para la consideración del Pleno del Consejo. Para el desarrollo de esta función, la Subdirección cuenta con una estructura de jefes de proyecto, uno para cada central en operación y uno para la fábrica de combustible de Juzbado, además de una estructura de inspección residente, con inspectores asignados a cada una de las centrales que, a su vez, se encuentran reforzados por una unidad de coordinación y apoyo en la sede de Madrid.

La subdirección se encarga también de los aspectos técnicos relacionados con la recopilación, análisis y realimentación de experiencia operativa por parte de los titulares de las instalaciones, de la normativa técnica que deben aplicar a estas y de los temas genéricos suscitados tanto en el ámbito nacional como en el internacional.

Los jefes de proyecto dependen del coordinador de Instalaciones Nucleares y trabajan desde la sede del regulador en Madrid, pero en contacto permanente con el titular de la central, con los técnicos del CSN y con los inspectores residentes, para tener disponible toda la información sobre la instalación y las actividades en curso.

Ellos elaboran las propuestas de dictamen técnico relativas a las solicitudes presentadas por el titular, distribuyen internamente en el CSN la documentación

presentada por la central y gestionan la asignación de trabajos de los técnicos del regulador, las peticiones de información adicional, las reuniones técnicas y las inspecciones. Además, son los encargados de supervisar el cumplimiento de la reglamentación vigente en las diferentes instalaciones, las condiciones de las autorizaciones de explotación y todos los requisitos que impone el Consejo.

Son también los encargados de proponer las sanciones o acciones coercitivas a los

titulares de las instalaciones, cuando reciben información sobre incumplimiento de la normativa o de los límites y condiciones de las autorizaciones vigentes. Para ello realizan, entre otras actividades, un seguimiento de las inspecciones en la instalación, en colaboración con la Unidad de Inspección, analizando los hallazgos y las actuaciones derivadas de estos controles.

Por último, los jefes de proyecto tienen un papel importante de apoyo en la respuesta a las emergencias de su planta,



Finalmente, también es responsable de las autorizaciones, inspección, control y desarrollo de normativa en relación con el transporte de materiales radiactivos.

P: Su equipo juega un papel importante para velar por la seguridad nuclear ¿Cuál es la clave para conseguirla?

R: Desde el punto de vista de la subdirección, es muy importante desarrollar y aplicar los elementos necesarios para poder hacer una valoración global de la seguridad de cada instalación y para detectar cualquier circunstancia en la que el nivel de seguridad se reduzca por cualquier motivo, con el objetivo de poner en marcha los mecanismos reguladores necesarios para rectificar la situación o tendencia adversa. En el momento actual, esos elementos son fundamentalmente el sistema de autorizaciones para las instalaciones nucleares, establecido en la reglamentación española, y los sistemas de supervisión, el SISC (Sistema Integrado de Supervisión de Centrales) para las centrales nucleares y el SSJ para la fábrica de Juzbado.

Para velar por que las instalaciones mantengan un adecuado nivel de seguridad, más que una clave lo que hay es una receta, aceptada casi con carácter universal. La pode-

mos resumir como adoptar y supervisar el cumplimiento de un cuerpo de normativa técnica solvente y reconocido, y poder asegurar que es el titular de cada instalación el responsable de su seguridad.

P: ¿Qué es lo que más destacaría de su equipo?

R: Su elevado nivel de profesionalidad y cualificación. Debido a la naturaleza del trabajo que realizamos en la SCN; necesitamos personas con una elevada orientación multidisciplinar y con un adecuado grado de flexibilidad para gestionar tanto las circunstancias del entorno interno del CSN como las de las instalaciones, las actividades y los titulares. El equipo actual de la SCN cuenta con un grupo de personas con dilatada experiencia en el ejercicio de las funciones asignadas a la subdirección, en el que esos valores y atributos se encuentran fuertemente implantados y probados en multitud de ocasiones.

P: ¿Cuáles son los retos a los que se enfrenta en la actualidad?

R: Yo destacaría dos retos fundamentales. El primero de ellos se basa en completar los procesos de supervisión o licenciamiento asociados a los requisitos derivados de las lecciones aprendidas tras el accidente de Fukushima y de las pruebas de resistencia realizadas en el ámbito de la Unión Europea. En este momento los titulares de las centrales han completado la implantación de las medidas planificadas a medio plazo y se encuentran desarrollando las de mayor envergadura que tenían un plazo más largo de implantación.

El segundo reto se refiere a las Revisiones Periódicas de la Seguridad (RPS) de nuestras centrales. En noviembre de 2014 se completó el segundo ciclo de RPS para todas las instalaciones. En el periodo decenal siguiente a la próxima RPS todas las centrales alcanzarán los 40 años de vida útil. Esto nos sitúa en un escenario de posible operación a largo plazo que tendremos que abordar.

ya que la SCN se encuentra dentro de la Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE) del CSN.

Otras áreas dentro de la SCN

La SCN cuenta también con dos áreas especializadas. La primera es el Área de Transportes, cuyos técnicos evalúan las solicitudes, realizan las propuestas de actuación, autorización e inspección de las tareas relacionadas con esta actividad. La otra es el Área de Experiencia Operativa

y Normativa, una pieza clave para la seguridad en las instalaciones, ya que se encarga de que las incidencias sean notificadas y analizadas por los titulares y comunicadas al resto de instalaciones para su análisis y obtención de lecciones aprendidas. Además, asignan el nivel en la escala INES de cada suceso.

Es importante también la actividad internacional de la SCN, que se centra en estudiar la experiencia operativa de las plantas nucleares en todo el mundo, para

proponer los análisis de aquellas experiencias que puedan ser aplicables en la mejora de la seguridad de las centrales españolas. Asimismo, coordina la participación española en la escala INES y en el sistema internacional de notificación de incidentes IRS (*Incident Reporting System*).

Sus técnicos participan también en grupos internacionales en el seno, entre otros, del Organismo Internacional de Energía Atómica, la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE y la Unión Europea.

Estimación de las dosis a las poblaciones en España como consecuencia del radiodiagnóstico médico

En el año 2011 se firmó un acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Málaga para la realización de una prospección sobre los procedimientos de radiodiagnóstico utilizados en los centros sanitarios españoles, su frecuencia y las dosis recibidas por los pacientes. Denominado Proyecto DOPOES (DOsis a la POblación por estudios de radiología diagnóstica en ESpaña), se desarrolló durante 35 meses, desde diciembre de 2011 hasta el 30 de septiembre de 2014. Hasta entonces en España no se había realiza-

do una estimación de las dosis impartidas a los pacientes, procedente de los procedimientos de radiodiagnóstico. Este tipo de estudios son fundamentales para conocer la situación dosimétrica respecto a los Estados miembros y para identificar, con la realización de estudios posteriores, la tendencia en la evolución de las dosis impartidas a la población. ■ Texto: **Rafael Ruiz-Cruces (coordinador del Proyecto), Sergio Cañete Hidalgo y Manuel Pérez Martínez** | Centro de Investigaciones Médico Sanitarias (CIMES), Facultad de Medicina de Málaga. ■

En las últimas décadas se ha producido un incremento considerable en el uso médico de las radiaciones ionizantes. En la actualidad, el número de procedimientos médicos que emplean radiaciones ionizantes ha aumentado de forma continua, de tal modo que más del 90 % de las exposiciones a las radiaciones ionizantes generadas por el ser humano provienen de los usos médicos, y la dosis colectiva debida a las exposiciones de los pacientes es 200 veces mayor que la dosis ocupacional de los trabajadores expuestos.

Al mismo tiempo, la aparición de nuevas tecnologías, el incremento del uso de la tomografía computarizada (TC) y su fusión con otras técnicas como las angio-TC, el desarrollo de la digitalización de imágenes radiológicas y las nuevas técnicas de radiología intervencionista, contribuyen también al aumento de las dosis recibidas por los pacientes, incluidos los pediátricos que son especialmente sensibles. Todo ello implica un desafío para las autoridades reguladoras

en materia de protección radiológica, cuyo objetivo es lograr que los riesgos en los pacientes sean lo más bajos posibles comparados con los beneficios que proporciona el empleo de las radiaciones ionizantes en el área médica, de acuerdo con el criterio Alara.

En nuestro ordenamiento jurídico existen varias referencias a la protección radiológica del paciente, de los trabajadores expuestos y del público en general. Destaca el Real Decreto 1976/1999, de 23 de diciembre, por el que se establecen los criterios de calidad en radiodiagnóstico, en el que cita que la verificación de dosis impartidas a pacientes en salas dedicadas a exploraciones simples se determine eligiendo la exploración más frecuente, tomando como mínimo una muestra de diez estimaciones. El Real Decreto 1085/2009, de 3 de julio, por el que se aprueba el *Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico*, potencia la protección radiológica tanto de los pacientes sometidos a pruebas

diagnósticas como de los profesionales que trabajan con estos equipos y del público en general.

La nueva Directiva 2013/59 Euratom, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, que debe transponerse a la legislación española antes de febrero de 2018, indica en su artículo 58. b) que la información relativa a la exposición del paciente debe ser parte del informe del procedimiento médico-radiológico.

Por otra parte, el artículo 64 establece la necesidad de que la distribución de la estimación de las dosis individuales debidas a exposiciones médicas con fines de radiodiagnóstico y radiología intervencionista esté determinada teniendo en cuenta, cuando proceda, la distribución por edad y sexo de la población expuesta.

La aplicación de esta normativa al marco nacional requiere, por una parte, de formación de los profesionales en los

nuevos procedimientos y, por otra, de la adaptación de los centros hospitalarios para poder cumplir los requerimientos, entre otros la utilización de sistemas automáticos de gestión de dosis. Estos sistemas permitirán realizar análisis estadísticos exhaustivos de las exploraciones y facilitar el establecimiento de los correspondientes niveles de referencia de dosis (DRLs). Existe una guía europea previa (RP-109), de 1999, donde se define qué es un DRL y qué debe tenerse en cuenta para realizar sus estimaciones.

El comité UNSCEAR, en su reunión celebrada en Viena en julio de 2008, destacó este hecho en su informe a la Asamblea General de Naciones Unidas. También la Organización Mundial de la Salud (OMS) lanzó durante el año 2008 una acción denominada *Global Initiative on Radiation Safety in Healthcare Settings*, poniendo de manifiesto la importancia del tema en la reunión plenaria del Comité de Expertos celebrada en Ginebra en diciembre de 2008.

Todo ello propuso el desarrollo de un acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Málaga (UMA) para la realización de una prospección sobre los procedimientos de radiodiagnóstico utilizados en los centros sanitarios españoles, su frecuencia y las dosis recibidas por los pacientes denominado Proyecto DOPOES (DOsis a la POblación por estudios de radiología diagnóstica en ESpaña). Este proyecto se desarrolló durante 35 meses, desde diciembre de 2011 hasta el 30 de septiembre de 2014. En España no se había realizado una estimación de las dosis impartidas a los pacientes, procedente de los procedimientos de radiodiagnóstico hasta la realización del Proyecto DOPOES. Este tipo de estudios son fundamentales para conocer la situación dosimétrica respecto a los Estados miembros y para identificar, con la realización de estudios posteriores, la ten-



La protección radiológica busca reducir los riesgos de las radiaciones ionizantes.

dencia en la evolución de las dosis impartidas a la población.

Metodología y resultados

Los objetivos específicos del Proyecto DOPOES han sido:

1. Determinar la relación entre las frecuencias de los diferentes tipos de exámenes con rayos X, las dosis típicas im-

partidas a los pacientes y su contribución a la dosis colectiva total en España en cada disciplina.

2. Comprobar si existen variaciones entre todas las comunidades autónomas en cuanto a frecuencias y dosis individual para cada tipo de examen con rayos X.

3. Estimar la contribución de los diferentes procedimientos radiológicos

médicos (radiodiagnóstico) a la dosis colectiva total en España.

4. Comparar las frecuencias y las dosis individuales anuales con las obtenidas en otros países de la Unión Europea.

5. Contrastar la contribución a la dosis de la población debida al radiodiagnóstico médico con las debidas a la exposición a otras fuentes naturales y artificiales de radiaciones ionizantes.

6. Proponer o ampliar valores de referencia de actividad actualizados para los procedimientos de diagnóstico con rayos X, con una contribución significativa a la dosis colectiva.

7. Identificar situaciones de potencial exceso de dosis acumulada, determinando cuando sea posible sus causas y recomendando medidas correctoras. Establecimiento de las bases para futuros desarrollos que incluyan la evaluación poblacional sobre el impacto en la salud de los procedimientos de diagnóstico médico.

8. Desarrollar una infraestructura para la obtención de información y una metodología para la evaluación de las dosis a los pacientes y para la estimación de las dosis a la población, que facilite la realización de nuevas prospecciones en el futuro.

9. Aportar información sobre la situación en España al proyecto de la Comisión Europea Dose Data Med 2 (DDM2).

A modo de resumen, dado que el desarrollo metodológico ya fue explicado en el número 21 la revista *Alfa* (II trimestre de 2013, página 54), hemos utilizado varias magnitudes dosimétricas como dosis en la superficie de entrada (DES) para los procedimientos de rayos X simples, el producto dosis-área (PDA) para los exámenes de fluoroscopia y radiología intervencionista, el producto dosis-longitud (DLP) para exámenes de TC y la dosis glandular media (MGD) en mamografías. Para todos los procedimientos de rayos X se ha calculado la dosis efectiva (E) siguiendo las re-



Hasta ahora no se había realizado en España una estimación de este tipo.

comendaciones del informe de RP 154 y también con el *software* PCXMC® rotación.

Asimismo, se han recopilado los listados completos de todos los procedimientos realizados con el sexo y la edad, la fecha y el equipo del hospital durante dos años (2010 y 2011). Se han obtenido directamente de una muestra en 33 hospitales públicos y privados españoles. Se han utilizado factores de escala para extrapolar a las comunidades autónomas, obteniendo las frecuencias totales de número de procedimientos anuales en cada región, previo al resultado final.

El número de códigos se ha obtenido de los sistemas RIS-PACS en cada hospital seleccionado. Debido al elevado número de procedimientos obtenidos y de las distintas codificaciones empleadas por los centros, ha sido necesario desarrollar, además de un sistema de codificación DOPOES propio (que incluye 571

procedimientos), un complejo sistema informático capaz de integrar toda la información recopilada.

Hemos recopilado valores de dosis de los procedimientos de rayos X directamente de las imágenes DICOM (sistema RIS-PACS) y a veces directamente en pacientes seleccionados. La muestra de pacientes seleccionados ha sido representativa con respecto al peso e indicación clínica. Dicha selección se ha realizado mediante muestreo aleatorio (10 hombres + 10 mujeres, 10 niños y 10 niñas, como pirámide de población) de cada tipo de procedimiento realizado.

Los resultados en España se han determinado a partir del análisis global de las comunidades autónomas, calculando los valores de frecuencia y dosis efectiva por procedimiento para el conjunto del país y así poder obtener un valor de dosis efectiva *per caput* para el conjunto de España.

Tabla 1. Distribución de la población en España por comunidades y ciudades autónomas

Comunidad	Habitantes
Andalucía	8.371.270
Aragón	1.344.509
Asturias	1.075.183
Baleares	1.100.503
Canarias	2.082.655
Cantabria	592.542
Castilla y León	2.540.188
Castilla-La Mancha	2.106.331
Cataluña	7.519.843
Extremadura	1.104.499
Galicia	2.772.928
La Rioja	321.173
Madrid	6.421.874
Murcia	1.462.128
Navarra	640.129
País Vasco	2.185.393
Comunidad Valenciana	5.009.931
Ceuta	83.517
Melilla	81.323
Total	46.815.919

Fuente: Instituto Nacional de Estadística 2011

El primer paso fue realizar el correspondiente estudio demográfico tal y como hemos explicado en el capítulo de material y método. En la tabla 1 se muestran los habitantes por comunidad según datos del INE 2011.

Tabla 2. Resumen de valores de frecuencia para el TOP 20

TOP 20	Número total por año	Incertidumbre número de procedimientos	Frecuencia anual por 1.000 habitantes
Tórax	12.517.586	3.254.572	266
Columna cervical	1.675.495	351.854	36
Columna dorsal	1.333.537	280.043	28,32
Columna lumbar	2.326.401	488.544	49,41
Mamografía	4.203.661	1.177.025	89,27
Abdomen	1.946.481	525.550	41,34
Pelvis y cadera	2.356.324	636.207	50,04
Gastro-duodenal	145.972	45.251	3,10
Enema opaco	100.549	31.170	2,14
Tránsito intestinal	56.741	17.590	1,21
Urografía intravenosa	132.543	41.088	2,81
Angiografía cardíaca	120.566	34.964	2,56
TC cabeza	1.027.529	287.708	21,82
TC cuello	353.120	102.405	7,50
TC tórax	647.268	187.708	13,75
TC columna	551.251	159.863	11,71
TC abdomen	747.095	216.658	15,87
TC pelvis	431.316	125.082	9,16
TC tronco	343.134	99.509	7,29
PTCA	83.388	26.684	1,77

El siguiente paso consistió en calcular las pirámides poblacionales para cada comunidad autónoma, para ver si existen diferencias en el patrón por sexo que pudieran afectar a la comparación de comunidades.

En la figura 1 se muestra la pirámide poblacional correspondiente al total de España y, como muestra de la similitud en el comportamiento de las pirámides poblacionales en cada comunidad, se muestra la Comunidad de Andalucía.

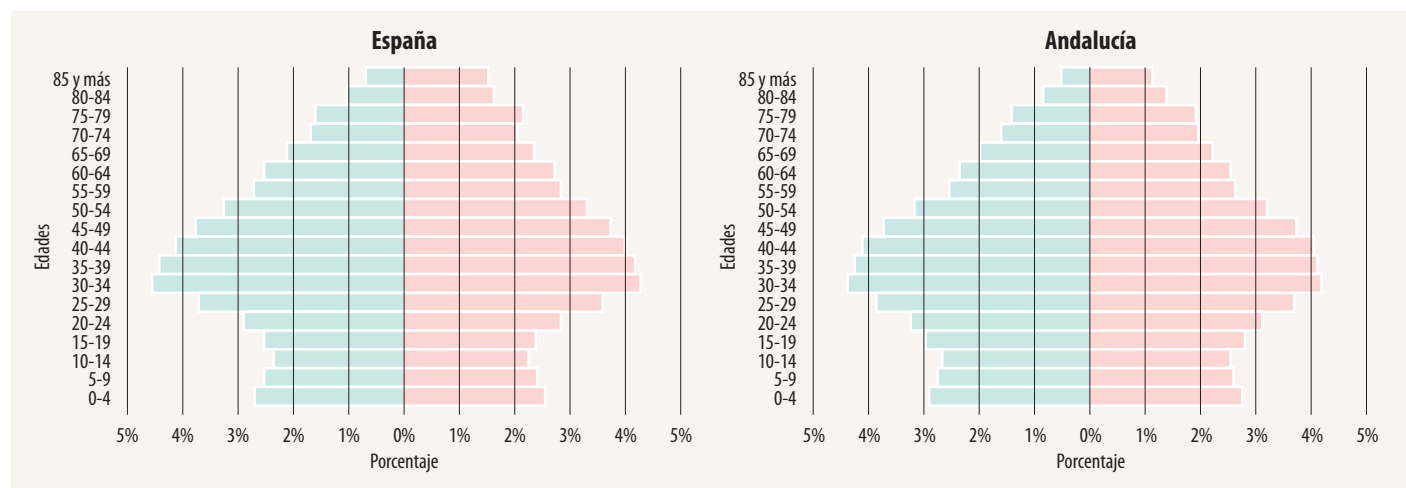
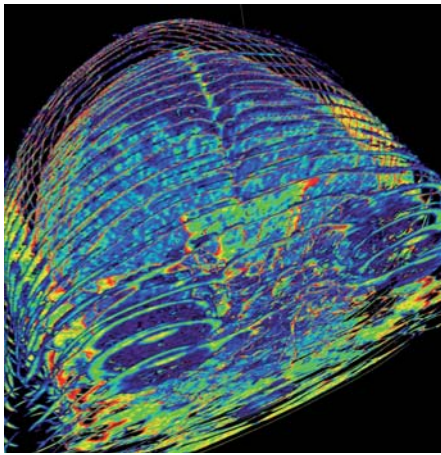
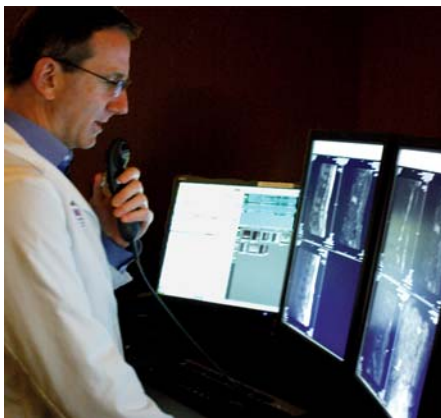


Figura 1. Pirámide poblacional de España y Andalucía (Fuente INE 2011).



Imágenes tridimensionales de un órgano.



La digitalización reduce el riesgo por exposición.

En la tabla 2 (página anterior) se muestran los datos más relevantes en frecuencia según el TOP 20 para el conjunto de datos analizados dentro del Proyecto DOPOES y obtenidos para España. Se muestra el número total de procedimientos por año, con su incertidumbre y la frecuencia anual por 1000 habitantes.

Los valores medios de dosis efectiva por procedimientos (mSv), dosis colectiva e incertidumbre de la dosis colectiva (manSv) se muestran en la tabla 3.

En la tabla 4 se muestra la contribución de los distintos procedimientos radiológicos dentales.

En la tabla 5 se muestra como resumen la contribución de cada conjunto del TOP 20 para obtener el correspondiente valor de dosis colectiva.

Del análisis de la información anterior se concluye que el valor de dosis

Tabla 3. Resumen de valores dosimétricos para el TOP 20

Examen	Dosis efectiva media por procedimiento (mSv)	Dosis colectiva por examen (manSv)	Incertidumbre de la dosis colectiva (manSv)
Tórax	0,04	499	164
Columna cervical	0,05	83	27
Columna dorsal	0,18	240	88
Columna lumbar	0,93	2.170	709
Mamografía	0,27	1.125	496
Abdomen	0,39	756	346
Pelvis y cadera	0,59	1.389	636
Gastro-duodenal	5,17	754	376
Enema opaco	8,79	884	440
Tránsito intestinal	9,98	566	278
Urografía intravenosa	2,14	284	141
Angiografía cardíaca	9,57	1.154	637
TC cabeza	1,68	1.730	542
TC cuello	2,38	842	389
TC tórax	6,38	4.126	1.782
TC columna	10,25	5.650	2.440
TC abdomen	10,87	8.125	3.509
TC pelvis	11,74	5.065	2.302
TC tronco	12,99	4.457	2.166
PTCA	19,59	1.633	1.025

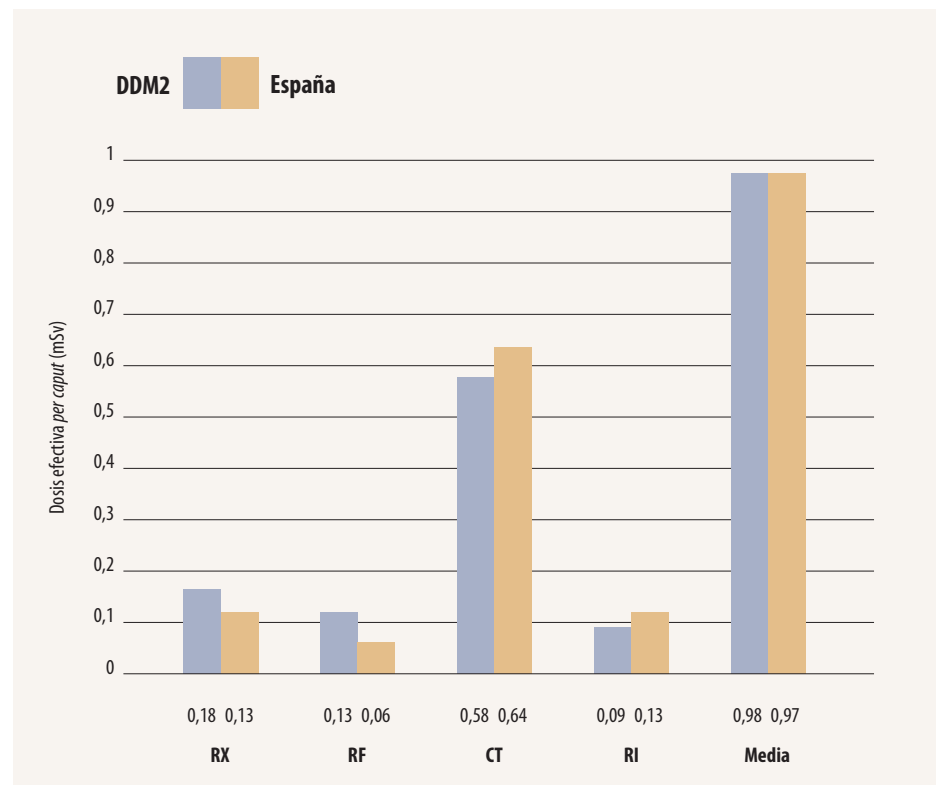


Figura 2. Dosis efectiva per cápita por procedimientos TOP-20 obtenidos en DDM2 y DOPOES.

Tabla 4. Contribución de los distintos procedimientos radiológicos dentales

Zona del cuerpo	Categoría de examen DDM	Examen dental	Número total por año	Frecuencia anual por 1.000 hab	Dosis efectiva	
					Dosis efectiva media (mSv)	Dosis efectiva colectiva anual por 1.000 habitantes (mSv)
Dientes y encías	Intra-oral ≤ 2 películas	1-2 películas periapicales	3.056.343	64,9	0,0035	0,23
		1-2 películas de mordida	2.237.662	47,5	0,0038	0,18
		1 película oclusal	621.070	13,2	0,0044	0,06
	Intra-oral	>2 películas periapicales	2.097.424	44,5	0,0058	0,26
		Estudio periapical boca llena	207.214	4,4	0,08	0,35
		>2 películas de mordida	1.675.820	35,6	0,0064	0,23
	Panorámico	Exploración panorámica boca llena	1.037.256	22,0	0,025	0,55
Cabeza	Dental	TC	9.204	0,2	0,35	0,07
	CBCT	CBCT	4.265	0,1	0,2	0,02
Total dentales			10.946.258	232,5		1,94

Tabla 5. Resumen de la contribución de cada conjunto de procedimientos a la dosis poblacional

España	Número total por año	Frecuencia anual por 1.000 habitantes	Dosis efectiva media por modalidad (mSv)	Dosis efectiva colectiva anual por 1.000 habitantes (mSv)
Radiología simple (TOP20, 1 - 7)	26.359.485	559,80	0,24	132,98
Todas las radiografías simples excepto dental	29.505.658	626,62	0,19	121,78
Radiografía/fluoroscopia (TOP20, 8 - 11)	435.805	9,26	5,71	52,85
Todas las radiografías/fluoroscopia	497.945	10,57	6,01	63,60
Angiografía cardíaca (TOP20, 12)	120.566	2,56	9,57	24,50
Todas las angiografías	199.517	4,24	10,05	42,60
Exámenes TC (TOP20, 13 - 19)	4.100.713	87,09	7,31	637,02
Todas las TC	4.762.126	101,13	6,38	645,23
PTCA (TOP20, 20)	83.388	1,77	19,59	34,69
Todas las radiologías intervencionistas	399.746	8,49	11,10	94,20
Todas las angios e intervencionistas	599.263	12,73	10,75	136,80
Suma de todas las radiografías basadas en rayos X excepto dental	35.364.992	751,05	1,29	967,41
Dental (excepto CBCT)	10.941.993	232,38	0,01	1,92
CBCT	4.265	0,09	0,15	0,01
Suma de todas las radiografías basadas en rayos X	46.311.250	983,52	0,99	969,35

efectiva *per caput* debida a procedimientos de radiodiagnóstico médico en España se estima en $0,97 \pm 0,35$ mSv una vez aplicados los correspondientes factores de corrección al TOP 20. En la figura 2 se muestran los valores de dosis efectiva *per caput* agrupados por modalidad radiológica considerada en el top-20 (radiología

simple, fluoroscopia, CT y radiología intervencionista). En la figura se puede comprobar que los valores reportados en este estudio son coherentes con los obtenidos como valores promedios en DDM2.

Respecto a los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia por 1.000 habitantes para el conjunto de procedimientos

radiológicos recogidos en el TOP 20, podemos concluir que, en promedio, los valores de frecuencia son comparables con los promedios obtenidos en DDM2, como queda reflejado en la figura 3 (página siguiente).

El estudio comparativo realizado para el conjunto de las comunidades



Procedimiento médico de diagnóstico.

autónomas se expone en las figuras 4 y 5, en las que se muestran la distribución de dosis efectiva *per caput* y el número de procedimientos por 1.000 habitantes, respectivamente.

Del análisis de la figura 4 podemos concluir que la comunidad autónoma con una menor dosis efectiva por habitante es la Comunidad Foral de Navarra, con un valor de 0,74 mSv, y en el otro extremo la Comunidad Autónoma de Canarias, con un valor de 1,21 mSv. Este rango de valores, considerando la incertidumbre asociada a su cálculo, es coherente con los valores reportados por países participantes en DDM2.

Del análisis de la figura 5 podemos concluir que la comunidad autónoma con una menor frecuencia por 1.000 habitantes es Galicia, con un valor de 809, frente a la Comunidad Valenciana con un valor de 1.089 procedimientos por 1.000 habitantes.

Es interesante indicar que los valores de frecuencia han sido obtenidos a partir de la totalidad de códigos DOPOES y

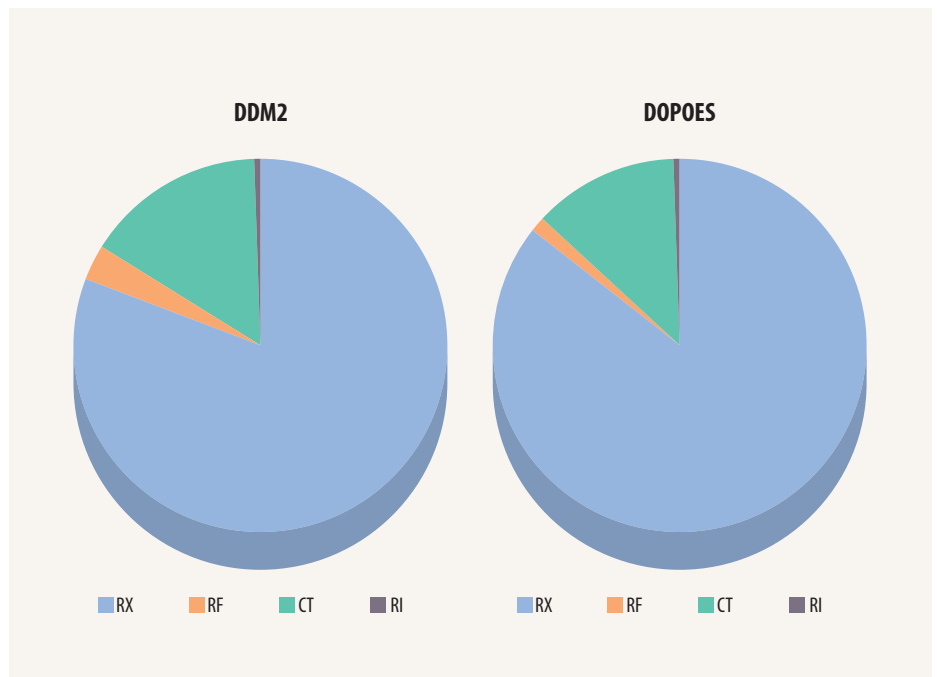


Figura 3. Comparativa en la distribución de frecuencia para procedimientos radiológicos agrupados por TOP 20 DDM2 frente a DOPOES.

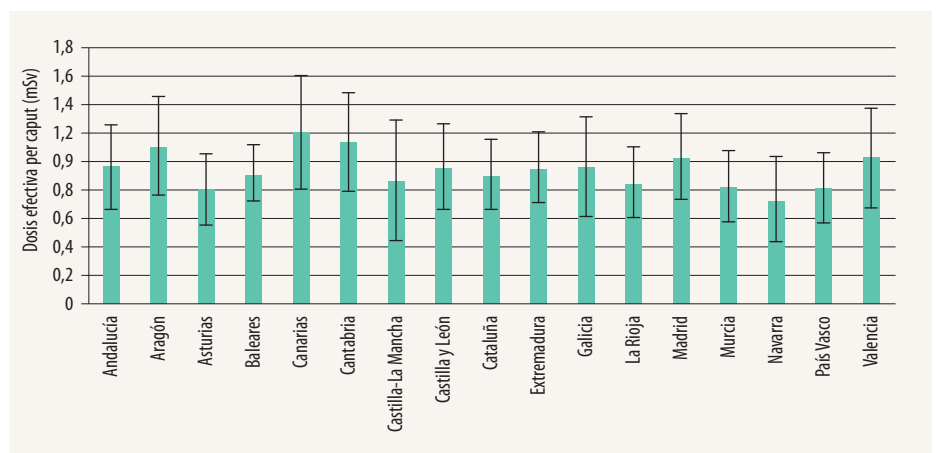


Figura.4. Valores de dosis efectiva *per caput* (mSv) para cada comunidad autónoma.



Las radiografías dentales son cada vez más frecuentes.

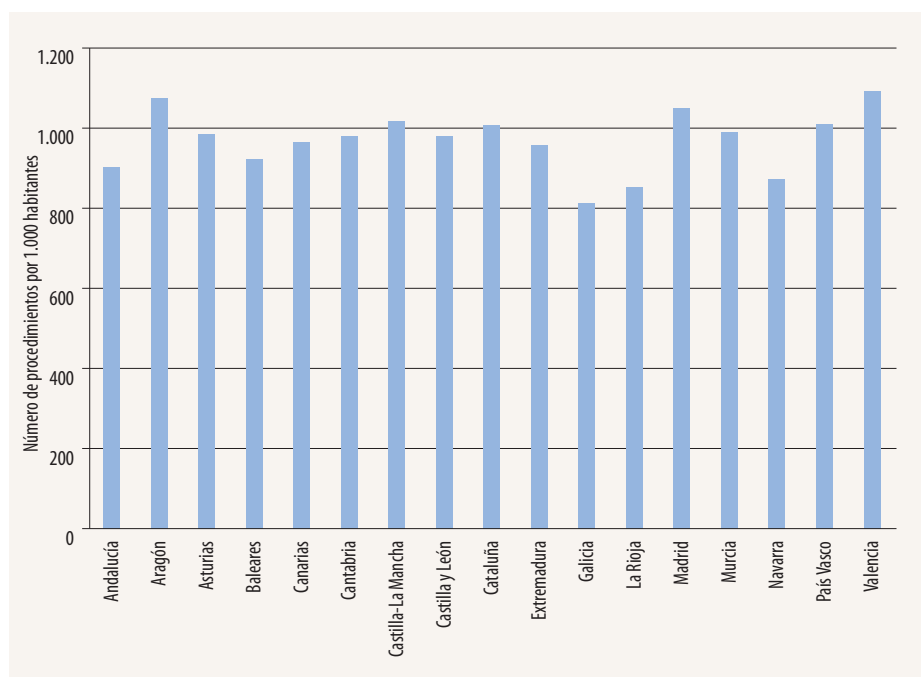


Figura 5. Números de procedimientos por 1.000 habitantes para cada comunidad autónoma.

Tabla 6. Estimación de valores de referencia de dosis

Examen	DRL	Magnitud (unidad)
Columna lumbar	410	PDA (cGy * cm ²)
Mamografía*	1,7	DGM (mGy)
Pelvis	290	PDA (cGy * cm ²)
Angiografía cardíaca	550	PDA (cGy * cm ²)
TC cabeza**	450	PDL (mGy * cm)
TC tórax	490	PDL (mGy * cm)
TC columna	690	PDL (mGy * cm)
TC abdomen	750	PDL (mGy * cm)
TC pelvis	780	PDL (mGy * cm)
TC tronco	890	PDL (mGy * cm)
PTCA	1.000	PDA (cGy * cm ²)

*por proyección, ** incluye facial-senos y cerebral diagnóstico.

PDA= Producto Dosis x Área, PDL = Producto Dosis x Longitud, DGM = Dosis Glandular Media.

Tabla 7. DRL en algunos procedimientos pediátricos

	CT	CT	CT	RF	RX	RX	RX	RX
Age	ABD	HEAD	CHEST	MCU	ABD AP	HEAD AP	PELVIS, PA	TO PA
	DLP*	DLP*	DLP*	DAP*	DAP**	DAP**	DAP**	DAP**
0	95,00	250,00	46,00	500	150,00	130,00	60,00	40,00
1-5	150,00	340,00	82,00	750	200,00	230,00	180,00	50,00
6-10	190,00	450,00	125,00	900	225,00	350,00	310,00	85,00
11-15	340,00	650,00	200,00	1450	300,00	430,00	400,00	100,00

* (mGy*cm); ** (mGy*cm²) ABD= Abdomen; MCU = *Micturating Cystourethrogram* (Cistouretografía miccional seriada CUMS); TO = Tórax; P=anteroposterior; PA=posteroanterior;

DAP = Producto Dosis x Área DLP = Producto Dosis x Longitud.

no por extrapolación a valores corregidos a partir del TOP 20.

Por último, y como resultado del objetivo número seis del proyecto DOPOES, se muestra en la tabla 6 una estimación de valores de referencia de dosis (DRL) (3º cuartil) para los procedimientos que mayor contribución aportan a la dosis colectiva, por encima de 1.000 manSv.

Además, en la tabla 7, se presentan los valores de referencia de dosis (DRL) (3º cuartil) para los procedimientos pediátricos (aportados al proyecto europeo PIDRL; <http://www.eurosafeimaging.org/pidrl>).

Agradecimientos

En nombre de todo el equipo humano de la UMA que ha hecho posible este proyecto, quiero expresar nuestro agradecimiento al Consejo de Seguridad Nuclear por su decidida apuesta en proyectos de investigación en materia de protección radiológica en medicina, con el apoyo del Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad.

Por último, quiero expresar también nuestro agradecimiento por la ayuda y el trato cordial recibido por los gerentes y por todo el personal de los servicios de radiología, cardiología intervencionista, radiofísica y protección radiológica e informática, así como a las UTPR (unidades de protección radiológica), que nos han aportado logística e información de clínicas dentales.





Acto de la firma de la Cátedra Vicente Serradell con la Universidad Politécnica de Valencia.

El programa de cátedras del CSN cumple diez años

La seguridad nuclear se abre un hueco en las universidades

En 2005, el Consejo de Seguridad Nuclear puso en marcha una experiencia pionera al firmar un acuerdo de colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en Barcelona, para crear una cátedra dedicada a la ingeniería nuclear para la formación y especialización de profesionales en esta materia. La experiencia fue tan positiva que hoy, una década después, aquella iniciativa se ha convertido en un programa más amplio y el CSN patrocina ya cuatro cátedras en total, dedicadas a la formación y la investigación en seguridad nuclear, mediante acuerdos con las universidades politécnicas de Barcelona, Madrid y Valencia. ■ Texto: **Lucía Caballero** | periodista científica ■

La construcción de la primera central nuclear española comenzó en julio de 1965 y tardó poco menos de tres años en completarse; la inauguración tuvo lugar el 12 de diciembre de 1968. El equipamiento, bautizado como José Cabrera (más conocido como Zorita), forma parte junto con los de Santa María de Garoña y Vandellós I de lo que integraría la primera generación de reactores nucleares en España.

Para su construcción, se contrató a un nutrido grupo de técnicos internacionales para operar en las instalaciones, mientras que la participación española en su gestión se fijó en un mínimo del 36 %, aunque acabó siendo bastante mayor: alrededor del 75 % en obra civil y montajes y el 60 % en áreas de ingeniería, según el informe *Capacidades españolas para afrontar un nuevo proyecto nuclear* de la Plataforma Tecnológica

de I+D de energía nuclear de fisión (CEIDEN).

Aunque escasos, existían ya algunos programas formativos en física nuclear, incluidos en las escuelas de ingeniería tras la celebración de la I Conferencia Internacional para los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear en Ginebra en 1955. Ese mismo año, la Cámara Oficial de Industria de Barcelona financió la creación de la Cátedra Fernando Tallada de ingeniería nuclear en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la capital catalana. En 1962, se inauguraba en sus instalaciones el primer reactor nuclear enteramente construido en España, con la participación de la antigua Junta de Energía Nuclear (JEN). Tenía carácter experimental y recibió el nombre de Argos.

Hoy, otra cátedra mantiene el nombre de este reactor pionero, la acordada entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad Politécnica de Cataluña. Es solo uno de los cuatro convenios que el organismo ha firmado con tres centros españoles de educación superior; entre los que figuran, además de la UPC, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Universidad Politécnica de Valencia.

En 2015 se han cumplido diez años del nacimiento de los primeros acuerdos,

pero sus cimientos llevaban tiempo asentándose. “A finales de los años noventa, el Consejo empezó a ser consciente de que el personal técnico estaba envejeciendo y empezó a plantearse la cuestión del relevo generacional”, explica Carlos Gimeno, asesor del CSN. Por entonces, alrededor de la mitad de la plantilla estaba compuesta por técnicos, que habían ingresado en el regulador nuclear tras su creación a principios de la década anterior. Desde entonces, su formación se había ido completando con la experiencia adquirida trabajando en el organismo, hasta acumular un bagaje que podía perderse si no se transmitía adecuadamente a las personas que fueran a sustituirles.

“En las universidades había programas de energía nuclear desde el punto de vista tecnológico, pero no específicos sobre seguridad”, indica Gimeno. Ante esta situación, con Juan Manuel Kindelán en la presidencia del CSN, comenzaron a plantearse medidas para instaurar la disciplina en las escuelas de ingeniería. Las ideas se materializaron algún tiempo después, con ayuda de la entonces consejera del CSN Paloma Sendín, que formaba parte también del consejo asesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.

En este marco, en 2004 se firmaba el primer acuerdo entre el CSN y la Escuela de Ingenieros de Minas de la universidad madrileña, por el que nacía la Cátedra del Consejo Seguridad Nuclear (rebautizada más tarde como Juan Manuel Kindelán), que sirvió de germen y experimento piloto para las posteriores. Tanto esta, como las cátedras Argos (UPC) y Federico Goded, se hicieron completamente efectivas al año siguiente.

Desde entonces, “siempre se ha pensado en una expansión, pero con la llegada de la crisis no se pudo aumentar la dotación ni hacer nuevos convenios”, indica Gimeno. En 2014 al fin se han



Cátedra Juan Manuel Kindelán

La Cátedra Juan Manuel Kindelán fue creada en mayo de 2004 y bautizada originalmente como Cátedra Consejo de Seguridad Nuclear. “En 2013 cambió de nombre, en reconocimiento al apoyo del expresidente del CSN a la cátedra, a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía y a su extensa carrera como profesional dentro del sector nuclear”, señala César Queral, actual director del equipo que coordina la cátedra en la Universidad Politécnica de Madrid.

Además de Queral, profesor de la escuela e integrante del equipo desde la fundación de la cátedra, colaboran en su gestión José Luis Parra, director de dicha Escuela y Benjamín Calvo, director de la Fundación Gómez Pardo. La vicepresidenta del Consejo, Rosario Velasco; Lucila M^a Ramos, subdirectora del Área de Protección Radiológica Ambiental, y la asesora de presidencia, Cristina Ruiz-Navarro, coordinan su funcionamiento desde el CSN.

“Organizamos todos los años cursos gratuitos para los alumnos e investigadores del centro, concedemos varias becas de grado, posgrado y doctorado, así como ayudas de viaje a congresos”, dice el profesor de la UPM.

Entre las tesis, pertenecientes al área de seguridad nuclear y protección radiológica, Queral destaca las relacionadas con la verificación de procedimientos de operación de emergencia y guías de gestión de accidente severo. Por otro lado, se han concedido tres becas de doctorado y una de proyecto fin de carrera en áreas relacionadas de nuevo con los análisis de seguridad de las centrales nucleares.

El pasado año, la financiación sirvió además para impartir dos cursos: uno sobre termohidráulica de reactores nucleares y otro sobre las metodologías de análisis de seguridad. En noviembre de 2014 organizaron unas jornadas sobre materiales en la industria nuclear, coordinadas junto con la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la misma universidad. Con una duración de una semana, a estas jornadas pueden asistir miembros del Consejo y trabajadores de empresas del sector, previo pago de una cuota. ▀

Cátedra Federico Goded

“La cátedra se creó a finales de 2004 e inició su actividad definitivamente en enero de 2005”, explica Eduardo Gallego, coordinador de la Cátedra Federico Goded en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. La reciente consideración del apoyo económico como una subvención ha abierto las puertas a nuevas actividades: “Ahora mismo tenemos un estudiante en la Comisión Chilena de Energía Nuclear, donde pasará tres meses como parte de su investigación de doctorado”, indica Gallego. Un viaje parcialmente cubierto por la cátedra.

El trabajo de coordinación desde la universidad, según el responsable, está basado en la voluntariedad y disposición de los profesores. “Colabora con nosotros la profesora Carolina Ahnert, catedrática de Energía Nuclear y anterior directora del comité”, señala Gallego. El resto del equipo lo integran Emilio Mínguez, director de la ETSI y José Manuel Perlado, director del Instituto de Fusión Nuclear; mientras que, por parte del CSN, lo componen la consejera Cristina Narbona, la asesora de presidencia Cristina Ruiz-Navarro, y Ramón de la Vega, jefe de la Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento.

En la actualidad, están financiando dos becas a estudiantes de doctorado. “No es una ayuda de estudios, sino un aporte económico para subsistir, como un salario”, sostiene el profesor. La duración en este caso viene limitada únicamente por la duración de la tesis, mientras que para trabajos de fin de grado y máster la cuantía se entrega durante seis meses.

Los proyectos se relacionan con diferentes campos, como el análisis, prevención y mitigación de accidentes, el hidrógeno en accidentes severos y aspectos que tienen que ver con la termohidráulica. “Hemos tenido también trabajos final de máster en sistemas de análisis y decisión en emergencias nucleares e impactos medioambientales de los escapes radiactivos”, enumera Gallego.

“La dotación se distribuye de manera que podamos sacarle todo el rendimiento”, afirma el docente de la UPM. Aparte de las becas, organizan seminarios y conferencias para completar la formación del alumnado en seguridad nuclear y protección radiológica. “También tenemos previsto invitar a expertos para que den alguna charla sobre temas avanzados”, dice.

El año pasado, hicieron lo propio con Luis Echávarri, exdirector de la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE, que dio un seminario sobre el futuro de la energía nuclear después de Fukushima. Por su parte, Eugenio Gil —miembro del cuerpo técnico del Consejo— impartió otro sobre la seguridad física de las fuentes radiactivas y los códigos de conducta y normativa en materia de seguridad y riesgos.

tomado dos medidas: por un lado, la financiación por cada cátedra ha pasado de los 60.000 euros iniciales a 70.000 y, por otro, se ha ratificado un nuevo acuerdo, el de la Cátedra Vicente Serradell, en la Politécnica valenciana.

Cada cátedra está dirigida por un comité de seguimiento integrado por seis personas, tres miembros del Consejo y otros tres del propio centro. Por parte del CSN, los equipos están formados por un consejero, un miembro del cuerpo técnico y un asesor del Gabinete Técnico de la Presidencia, que actúa como coordinador común a todas las unidades. Por



parte de las universidades se encargan, por lo general, el director de la escuela o el departamento, un coordinador y algún otro experto en el área.

El objetivo principal de todas ellas es la formación de profesionales especializados en seguridad nuclear y protección radiológica. Con este fin, el dinero que reciben las escuelas de ingeniería se utiliza, en su mayor parte, para financiar becas destinadas a estudiantes de últimos cursos de grados o máster, e investigadores de doctorado especializados en estas áreas. “Antes de sacar las convocatorias, se decide de forma conjunta cómo se gastará el presupuesto, cuánto se va a destinar a cada tipo de ayuda”, explica

Cátedra Argos

“El planteamiento ha ido cambiando un poco cada año en función de las distintas actividades que hemos planteado”, indica Lluís Batet, profesor de la Universidad Politécnica de Cataluña y coordinador de la Cátedra Argos, gestionada desde el CSN por el consejero Antoni Gurguí i Ferrer; Miguel Sánchez, jefe del Área de Modelización y Simulación, y Cristina Ruiz-Navarro, asesora de la presidencia del Consejo.

Debido a la distancia que separa el centro de la sede madrileña del Consejo, las reuniones físicas con los otros miembros del comité de seguimiento “son más bien escasas”. Aunque se mantienen en contacto. “Normalmente, a principios de año sacamos una convocatoria de ayudas a doctorado, proyectos final de máster y grado, ayudas para viajes y otras cuestiones menores”, explica Batet. Antes, envían una propuesta al Consejo para recibir su aprobación. “Primero nos ponemos de acuerdo sobre el presupuesto general, luego decidimos qué parte emplearemos en una primera convocatoria y qué porción en la segunda”, continúa el coordinador de la cátedra. Eligen entre todos los proyectos que se presentan y elaboran una nueva propuesta de resolución, que de nuevo consultan con el CSN para convertirla en definitiva.

“Las actividades de la cátedra están integradas dentro del funcionamiento diario de la Escuela”, aclara Batet. Durante los últimos años, una fracción de la misma ha servido para cubrir la matrícula de máster a estudiantes de ingeniería. “También hay miembros del Consejo que participan en labores formativas e imparten cursos específicos en algún área de los pro-

gramas de estudio”, prosigue el profesor de la UPC.

Como el resto de coordinadores, Batet recalca la importancia de las bolsas de viaje. “Cada año se van dos o tres estudiantes a otras universidades de la red INSEN (siglas de *International Nuclear Security Education Network*), una red internacional que reúne a centros de formación en áreas relacionadas con la energía nuclear.

Durante estos diez años, “la filosofía de la cátedra siempre ha sido acorde con las funciones de la universidad: generar conocimiento, difundirlo y también transferirlo”, enumera Batet. Donde más apoyo falta, según el experto, es en la investigación básica, donde precisamente destaca el valor del acuerdo: “Gracias a ello hemos podido mantener las ayudas al doctorado”.



No obstante, el profesor advierte de que el dinero cada vez rinde menos. “Los costes mínimos de contratación de becarios y los gastos en general han ido subiendo”, señala.

Lluís Batet, profesor del Departamento de Física e Ingeniería Nuclear de la UPC y coordinador de la Cátedra Argos.

Otra fracción se invierte en apoyos económicos para estancias de investigación, asistencia a congresos y para financiar charlas y seminarios de expertos internacionales. “Una cuestión interesante son las bolsas de trabajo para que los estudiantes de ingeniería puedan realizar parte de sus estudios en el extranjero”, indica Batet.

También repercute en el Consejo. “Nos sirven además para realizar actividades de servicios, proyectos específicos de I+D y para reforzar el conocimiento de nuestro propio personal técnico”, recalca Gimeno. Pese a que tienen decenas de acuerdos con diferentes universidades, el asesor del CSN asegura que las cátedras son el principal vivero que les nutre de profesionales cualificados. Porque actúan como un reclamo para los estudiantes, que les proporciona una estrategia de orientación

profesional. “Ven que es un campo donde hay oportunidades de trabajo y una verdadera salida laboral”, añade.

Una buena prueba de estas perspectivas profesionales es que este año el CSN ha convocado 20 plazas para incorporarse al cuerpo técnico del organismo, tras varios años sin oposiciones. Según Gimeno, “La seguridad nuclear no puede descuidarse, hay que tener en cuenta sus peculiaridades. El escenario probablemente se repita al año que viene, pero la actual

Cátedra Vicente Serradell

El pasado mes de febrero, Francisco Mora, rector de la Universidad Politécnica de Valencia, y el consejero del CSN, Fernando Castelló, ratificaban el acuerdo para formalizar la última cátedra creada por el Consejo: la bautizada como Vicente Serradell, en honor al catedrático de ingeniería nuclear y exdirector del Laboratorio de Radiactividad Ambiental fallecido en 2013.

“La iniciativa está muy bien dotada económicamente y aspira a consolidarse año tras año, lo que dibuja un horizonte de colaboración muy sólido a medio plazo”, destacó Mora durante el encuentro.

Por su parte, Gumersindo Verdú, catedrático del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV, cree que “el acuerdo servirá para reforzar el área de Ingeniería Nuclear del departamento y fomentar que los alumnos vean su gran potencial”. Verdú es el director de la cátedra en la universidad, y miembro del comité de seguimiento junto con José Millet Roig, director delegado de Emprendimiento y Empleo, y Jorge García-Serra, director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Castelló, María Jesús Muñoz, jefa de la Unidad de Apoyo de la Dirección Técnica de Protección Radiológica, y Cristina Ruiz-Navarro, asesora de presidencia, son sus representantes por parte del CSN.

Crear este tipo de lazos “es fundamental para potenciar la I+D y la formación”, señala Verdú. A pesar de llevar poco tiempo en marcha, la cátedra ya ha organizado varios seminarios celebrados en primavera y verano: uno sobre verificación de incertidumbres y otro para aplicar la dinámica de fluidos computacional en el entorno industrial y de investigación.

“Todas las actividades son destacadas, pero merece la pena resaltar el seminario sobre códigos acoplados impartido por el experto en ingeniería nuclear Kostadin Ivanov”, asegura el director de la cátedra. Durante los meses finales del año se prevén dos cursos más, uno de ellos abordará el tratamiento de emergencias radiológicas en instalaciones radiactivas y nucleares; “durante las jornadas los expertos en esta área debatirán sus ideas y propuestas”, indica Verdú.

En cuanto a las ayudas a la realización de tesis doctorales, “se potenciarán principalmente las líneas de investigación relacionadas con la protección radiológica”, asegura. El acuerdo ha permitido la concesión de tres becas a científicos del centro para que puedan desarrollar sus proyectos en temas como la medida de radiactividad ambiental y las metodologías de evaluación de incertidumbres en modelos termohidráulicos. ▶

demanda no durará eternamente. Dentro de diez o veinte años, el personal antiguo se habrá renovado, y ya no habrá tanto requerimiento”.

También en 2015 se ha modificado el carácter legal de la dotación económica. “Antes se renovaba anualmente con una cláusula adicional, sin tocar ningún detalle del acuerdo inicial”, afirma Eduardo Gallego, catedrático de Ingeniería Nuclear de la UPM y responsable de la Cátedra Federico Goded. A partir de ahora, la dotación económica se otorgará en forma de subvención, de forma que cada año habrá que aprobar un nuevo docu-



mento, de acuerdo con la Ley General de Subvenciones. Aunque haya podido provocar cierta sensación de inseguridad no significa, según Gimeno, ningún otro cambio en los acuerdos.

En los centros, lógicamente, necesitan estos ingresos: “Es difícil conseguir ayudas para los estudiantes”, afirma Gallego. Y el incentivo que encuentran es más que económico, “que un organismo tan importante como el CSN aprecie los estudios que impartimos aquí, es un gran estímulo para estudiantes y profesores”, sostiene el catedrático. El estímulo necesario para gestar una remesa de técnicos y profesionales en seguridad nuclear que emplear fuera de las aulas. ©



El Centro de Información del CSN introduce nuevos módulos interactivos

La renovación de un clásico

La relevancia social de las tareas encomendadas al Consejo de Seguridad Nuclear confiere especial importancia a la transparencia y a la información pública de sus actividades, como queda reflejado en el ordenamiento jurídico por el que se rige. Dentro del conjunto de acciones que lleva a cabo para divulgar las particularidades de su ámbito de actuación reguladora, destaca el Centro de Información, que alber-

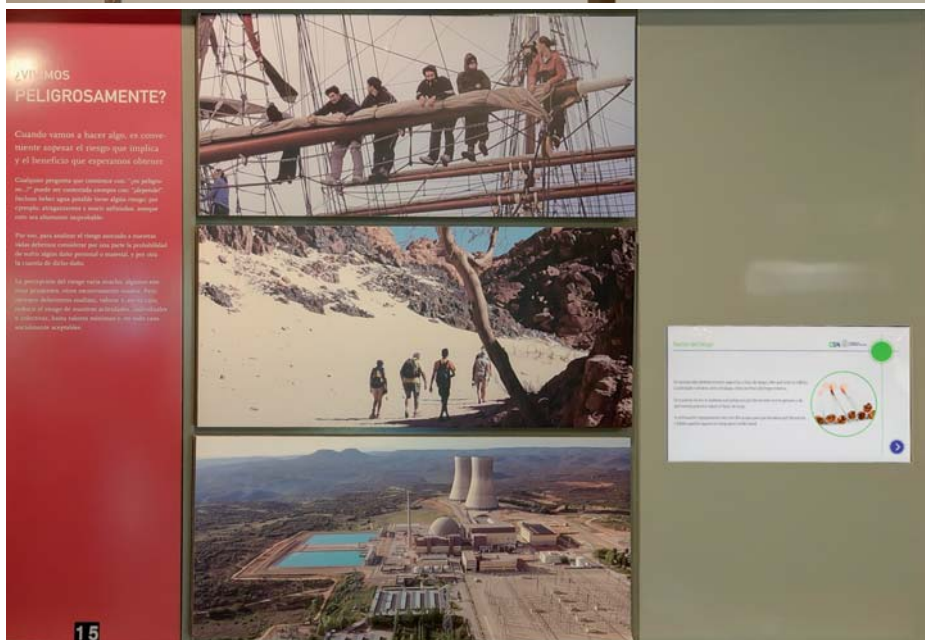
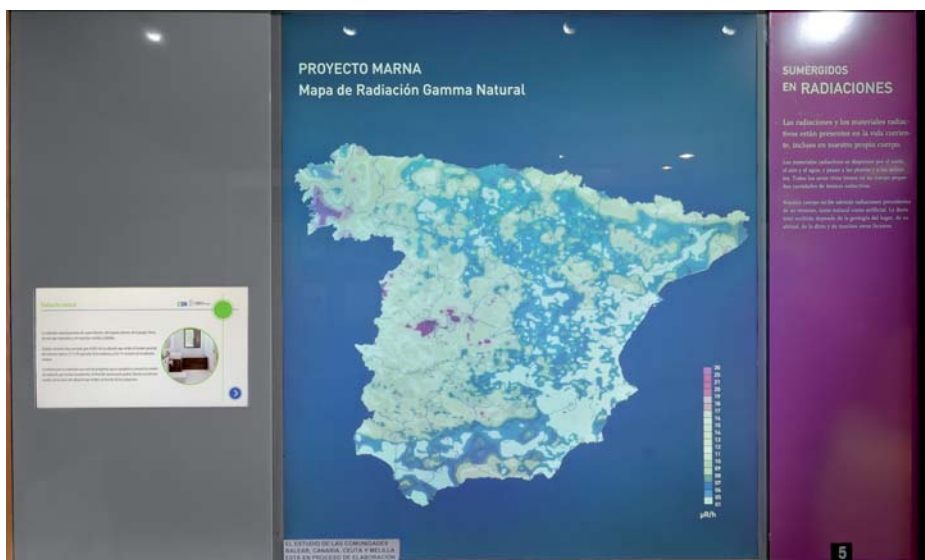
ga una exposición permanente, de carácter divulgativo para adaptarla a un público general, con módulos interactivos y paneles explicativos sobre el mundo nuclear y las radiaciones ionizantes. Ahora, cumplidos 16 años de actividad, ha realizado una renovación más a fondo que se une a las constantes actualizaciones que en este tiempo ha realizado. ■

Texto: **Antonio Villarreal** | periodista científico ■

Desde su inauguración, en octubre de 1998, hasta la fecha, el Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear ha recibido más de 108.000 visitantes, normalmente durante los horarios de visita programada, a las 10:00 y a las

12:15 de los días laborables. De todos ellos, el 95 % corresponde a las visitas de centros escolares y el 5 % restante a miembros de asociaciones, centros de adultos, instituciones culturales y, por supuesto, visitas institucionales o a título individual.

“El centro está dividido en cuatro grandes ámbitos, repartidos en 29 módulos”, explica una de las guías del centro. “La mayoría tienen un apartado interactivo y muchos de ellos están adaptados para discapacitados, sensoriales y motores”. En cada uno de ellos, además de los puntos



Algunos de los paneles cuya información se ha actualizado.

de información ya existentes, se han instalado recientemente, como parte de la actualización de sus contenidos, aplicaciones interactivas con pantallas táctiles.

Radiación natural

Los visitantes comienzan conociendo a los investigadores que tuvieron que ver con el descubrimiento de la radiactividad y sus aplicaciones, de Marie Curie a Einstein pasando por el español Blas Cabrera. Un ordenador les permite ampliar la información.

“Hablamos de los conceptos físicos, de dónde viene la radiactividad, de los átomos inestables, de la radiación alfa, beta, neutrones, rayos X, rayos gamma...”, dice esta empleada. En esta zona, la principal atracción es una cámara de niebla, un dispositivo en el que los visitantes pueden ver con sus propios ojos las trazas que dejan las partículas radiactivas que cruzan la atmósfera sin que nos percatemos de ello.

La cámara consiste en una caja negra de algo más de un metro de alto. “Esto funciona con alcohol propanol, que primero cae en ese canal para que se caliente y luego, una vez que se ha calentado, se evapora, se deposita en una plancha oscura que hay en el fondo y que está enfriada a menos 30 °C”, explica la guía, “y así conseguimos que el propanol forme una niebla, de ahí el nombre de cámara de niebla”. Cuando una partícula radiactiva de las que hay en el ambiente entra en la cámara, choca con los átomos de las moléculas de propanol, son ionizados y dejan una tenue traza que, segundos después, desaparece. “Aquí no se ve el efecto de los rayos X, los rayos gamma o los neutrones”, prosigue la guía, “porque solo se ve el efecto de partículas cargadas: se ven las alfa, que son las que mayor masa tienen, se ven las beta, se puede ver un protón o un muón”. También existe la posibilidad de introducir en la cámara un poco de gas radón para inducir trazas.

Uno de los módulos que se han actualizado en esta área permite medir la radiación natural a la que el visitante está expuesto, que varía según dónde vive o las características geográficas del terreno. Los habitantes de Madrid, debido al granito de la sierra, o de Pontevedra, suelen recibir más radiación natural que otros ciudadanos españoles. “En la pantalla táctil se hacen ocho preguntas acerca de la radiación natural a la que estamos expuestos”, explican desde el Centro. Una vez completado el test, los visitantes pueden imprimirlo.

Radiación artificial

Este ámbito recoge los usos que el ser humano ha dado a las radiaciones ionizantes en industria, medicina e investigación. “Hablamos de aplicaciones para conservar alimentos, esterilizar material quirúrgico, cambiar el color del cristal, usos en la industria aeroespacial, datación de obras de arte con la técnica del carbono-14, comprobar medidas ambientales, control de plagas con la técnica denominada del insecto estéril, cables ignífugos, para el tratamiento de la madera... incluso, para controlar muchos otros procesos industriales”, explica la guía del Centro.

Además de conocer más sobre el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares suscrito por España o conocer en qué consisten las radiografías, los escáners o TC, PET y otras técnicas de imagen, “hablamos de la radioterapia, hablamos de la medicina nuclear”. También se explica el uso más conocido de los fenómenos nucleares, que es la producción de electricidad. “Lo explicamos desde el principio, con la minería del uranio, hasta el almacenamiento de residuos en centros como el futuro almacén temporal centralizado”, dice la guía.

Aunque a decir verdad, a los jóvenes visitantes del Centro de Información casi les impresiona más conocer que la radiac-



Módulo que explica los efectos de la radiación en el ADN.

tividad se utiliza “para comprobar el nivel de llenado de los envases de refresco”.

Riesgos de la energía nuclear

La novedad aquí está en otra pantalla táctil interactiva que consiste en un pequeño test. En él, los visitantes pueden valorar la noción de riesgo de cada uno ante los riesgos laborales, el tabaco, el tráfico o la energía nuclear. “Les hacen un juego, exponen diferentes situaciones y los visitantes tienen que solucionarlas, es un pequeño truco para reforzar el contenido que les damos durante la visita”.

En la tercera parte del recorrido, se enseña a diferenciar entre residuos de baja y media actividad —aquellos que van a El Cabril— y los de alta actividad. El Centro cuenta con una maqueta giratoria del futuro ATC, que albergará los de alta actividad, y con otra dedicada a El Cabril y, compuesta de dos partes, una muestra

el aspecto actual de las celdas de almacenamiento y otra la zona restaurada por la cubierta vegetal, como quedará en un futuro, que aparece como por arte de magia gracias a un juego de espejos.

También se explica cómo afectan las radiaciones ionizantes a los seres vivos, cómo pueden alterar la cadena de ADN o las células. Para ilustrarlo, exhiben fragmentos de frases de escritores como Machado o Cervantes, en las que algunas letras giran y cambian el sentido de la palabra, y por tanto, de la frase.

Otro de los nuevos módulos en esta área muestra las dosis de radiación que recibimos cuando, por ejemplo, nos sometemos a pruebas de radiodiagnóstico, o los límites de dosis que pueden recibir los diferentes trabajadores. Y aquí también podemos comprobar lo que recibimos anualmente de radiación natural, es decir, por la radiación terrestre o la alimentación.

Llevarse las ideas a casa

Después de la visita guiada, que dura unos 60 minutos, y tras el vídeo con el que concluye, se dispone de un tiempo libre para que los visitantes amplíen la información en los módulos interactivos. Además, los estudiantes reciben material que les permita más adelante refrescar las ideas y conceptos que han asimilado durante el recorrido. Para ello, se les entregan algunas de las publicaciones editadas por el CSN. Estas publicaciones incluyen revistas como la propia *Alfa*, que tiene el lector entre sus manos, pósters, folletos, libros o algunos de los trípticos editados por el Consejo, como *Salem: Sala de Emergencias*, *Transporte de material radiactivo*, *Marna: mapa de radiación gamma natural en España* o el de *Radiaciones en Medicina*. ▶



Vista general del túnel del Centro de Información.

“Al igual que en el módulo de la radiación natural, aquí hay un programa con ocho preguntas para que los visitantes conozcan las dosis que pueden recibir, pero esta vez, en lugar de la radiación natural, se centra en la radiación artificial”, dice la guía.

La visita cuenta, por supuesto, con muchas actividades adaptadas a discapacitados sensoriales. “A veces vienen alumnos del colegio de la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE), que es una visita habitual y especial, o bien algún chico integrado en una clase de cualquier instituto. Entonces, la ONCE nos ha adaptado algunos paneles en braille”. Otra de las novedades del Centro es que se ha preparado una visita virtual que incluye guías que faciliten su comprensión a los estudiantes sordos. Además, algunos de los módulos interactivos cuentan con una luz intermitente o con textos escritos y/o con voz para facilitar su uso a este tipo de visitantes.

Función del CSN

Finalmente, la exposición analiza la labor encomendada al CSN. Según la guía, “en todas las actividades que tienen que ver con las radiaciones o la actividad nuclear puede surgir algún problema y la función del Consejo de Seguridad Nuclear es prevenirlo, detectarlo y solucionarlo. En el Centro “también contamos con un mapa que refleja los organismos reguladores que hay en el mundo con los que el CSN tiene un acuerdo”.

Una de las funciones importantes del CSN es el control de los transportes de material nuclear. Para lo cual existe en el Centro de Información un módulo explicativo con contenido acerca de normativa, enfocado a personas más expertas, y apoyado por un juego interactivo de preguntas y respuestas.

En relación con la protección radiológica de los trabajadores, se muestran en



Vista parcial de la zona expositiva dedicada a los usos de las radiaciones.

un expositor algunos dispositivos destinados a detectar la radiación, sistemas de protección individual (trajes, máscaras, dosímetros, profilaxis, etc). Se completa este módulo con un sistema interactivo para reforzar la idea de protección mediante los principios de distancia, barreras y tiempo. También, una explicación de cómo funciona el REVIRA, la Red de

Vigilancia Radiológica Ambiental que también coordina el CSN.

En otro módulo se muestran las licenciaturas de las personas que trabajan en el Consejo y los departamentos en los que están integrados. Se hace especial incidencia en el espectro tan amplio de la formación de los profesionales del organismo.

La Sala de Emergencias del CSN (Salem) es otro de los módulos actualizados. En él, el visitante se pone en la situación de una emergencia nuclear o radiactiva, viendo dónde está el problema, comprobando cómo llegan las comunicaciones y cómo se gestiona. Este módulo tiene mucho éxito ya que se desarrolla todo a través de un videojuego educativo tipo Sims en el que, con un *joystick*, los visitantes manejan a un personaje que debe desplazarse por distintos lugares dentro de la Salem para ir obteniendo información.

Una vez completado el recorrido, el siguiente punto es el pequeño auditorio con que cuenta el Centro. Allí, los visitantes disfrutan de un vídeo de ocho minutos, antes de salir provistos de material informativo y pistas sobre lo que pueden encontrar en la página web del CSN. En total, una hora y media en el Centro de Información para tratar de comprender un tema tan complejo de una forma amena; una tarea formativa para la que se cuenta con la asistencia de la tecnología. ©



El módulo que explica el espectro de la radiación electromagnética.

Gestión de los residuos radiactivos generados en medicina nuclear

■ Texto: **Pilar Lorenz Pérez** | Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas del CSN ■

La medicina nuclear es una especialidad clínica en la que se utiliza material radiactivo, en forma no encapsulada, para el diagnóstico y el tratamiento de pacientes. El material radiactivo (radiofármaco) se presenta, generalmente, en forma líquida y se administra al paciente por diferentes vías; la inyección intravenosa es la más común.

Durante la preparación del radiofármaco, la inyección, el examen o el cui-

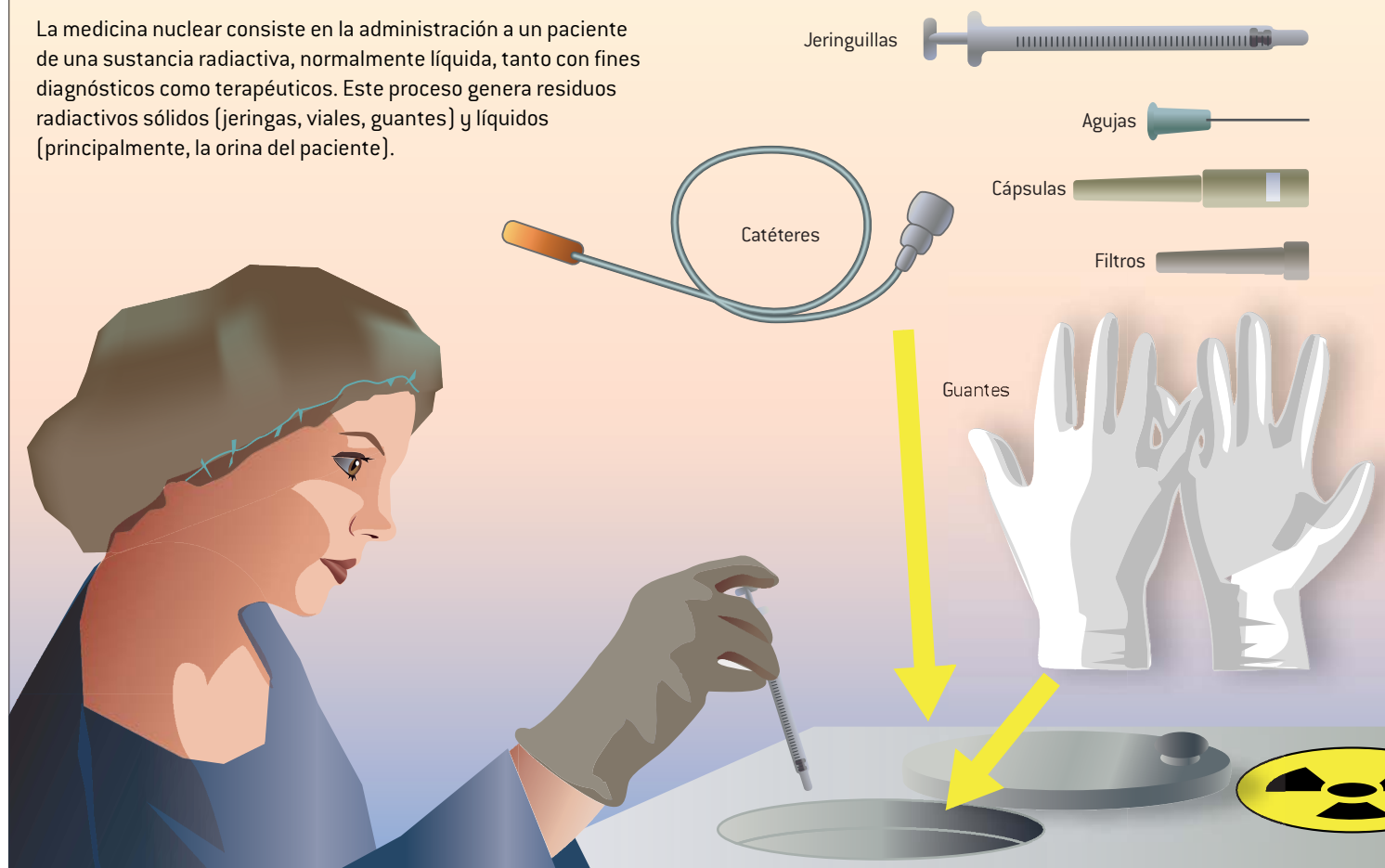
dado del paciente se generan residuos radiactivos de distintos tipos, tanto sólidos como líquidos. Entre los primeros se encuentran papeles, algodones, guantes, viales vacíos, jeringas, generadores de radionucleidos y otros artículos usados por pacientes hospitalizados tras un tratamiento con radioisótopos (ropa de cama...), que hayan podido quedar contaminados. Los residuos líquidos son fundamentalmente restos de mate-

rial radiactivo que no ha sido utilizado y excretas de los pacientes a los que se les ha administrado; el mayor volumen corresponde a las orinas de pacientes con cáncer de tiroides tratados con yodo-131.

Dado que los radionucleidos que se utilizan en medicina nuclear son de vida corta (periodo de semidesintegración inferior a 100 días) o muy corta (horas), la mayoría de los residuos pueden

Residuos radiactivos sólidos y líquidos de la medicina nuclear

La medicina nuclear consiste en la administración a un paciente de una sustancia radiactiva, normalmente líquida, tanto con fines diagnósticos como terapéuticos. Este proceso genera residuos radiactivos sólidos (jeringas, viales, guantes) y líquidos (principalmente, la orina del paciente).



ser evacuados al medio ambiente tras un periodo de almacenamiento en la propia instalación para su decaimiento, y solo unos pocos deberán ser retirados y gestionados por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa).

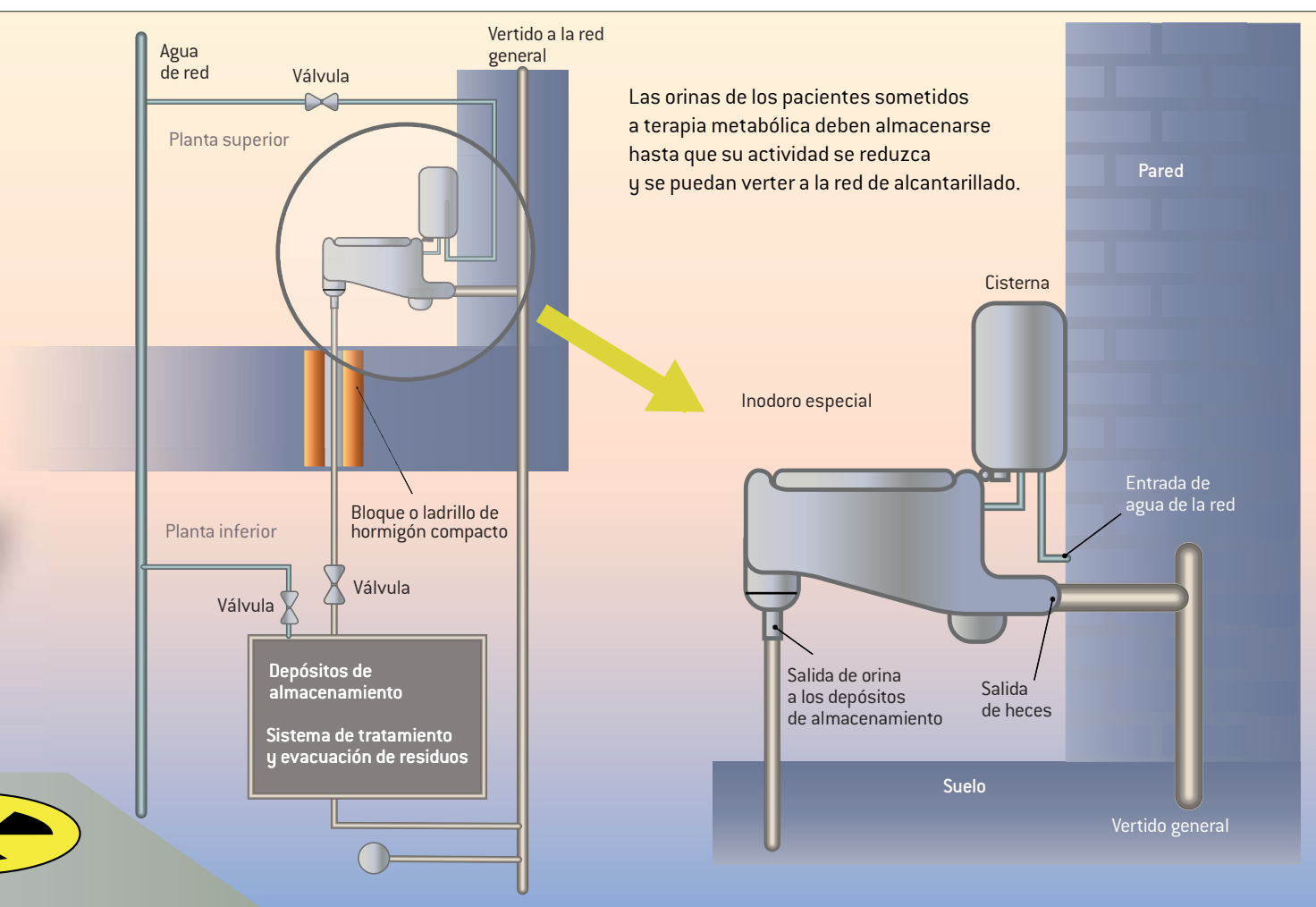
El primer paso para la correcta gestión de los residuos es su segregación en función de su vía de gestión final, separando los materiales residuales con contenido radiactivo que pueden evacuar directamente de aquellos que necesitan un tiempo de decaimiento previo y de los que han de ser retirados por Enresa. Para ello es necesario disponer de sistemas adecuados para su recogida (bolsas, contenedores), correctamente identificados y señalizados, y de un lugar apropiado para su almacenamiento temporal, así como de sistemas de registro.

En el caso de los materiales residuales sólidos, la Orden ECO/1449/2003, de 21 de mayo, establece los niveles de actividad, para diferentes radionucleidos, por debajo de los cuales tales materiales no tienen la consideración de radiactivos y su gestión puede ser realizada de acuerdo con la normativa que les sea de aplicación (residuos sanitarios, tóxicos, infecciosos...).

En cuanto a los residuos líquidos, consisten principalmente en restos de radiofármacos que puedan quedar en un vial sin utilizar y, en mayor proporción, en las excretas de los pacientes. En el caso de los pacientes de diagnóstico, generalmente no hay necesidad de retener las orinas y se pueden usar los WC normales. Sin embargo, en el caso de los pacientes sometidos a tratamiento con material radiactivo, principalmente en la terapia con

yodo-131 (en la que se administran actividades elevadas de este radionucleido cuyo periodo de semidesintegración es de 8 días), gran parte de la actividad administrada se elimina vía urinaria, por lo que se deben utilizar inodoros separados para recoger las orinas y almacenarlas hasta que por decaimiento y dilución se alcancen unos niveles de concentración de actividad del radionucleido que permitan su evacuación al sistema de alcantarillado público. Para ello en la mayoría de los centros sanitarios se dispone de tanques de almacenamiento con sistemas automáticos de vertido controlado.

En resumen, la gestión de residuos en medicina nuclear implica una buena segregación de estos materiales, una clasificación correcta y un control riguroso de las evacuaciones, debiendo dejar constancia detallada en registros.



Cristina Narbona Ruiz nació en Madrid en 1951, aunque vivió con su familia en la capital de Italia hasta 1975. Es doctora en Ciencias Económicas por la Universidad de Roma y ejerció como profesora de Economía Internacional en la Universidad de Sevilla, aunque la mayor parte de su actividad profesional la ha realizado en la Administración del Estado, donde ha ocupado, entre otros, los cargos de viceconsejera de Economía de la Junta de Andalucía, directora del Banco Hipotecario de España, directora general de la

Vivienda, secretaria de Estado de Medio Ambiente y Vivienda y concejala del Ayuntamiento de Madrid. Fue ministra de Medio Ambiente entre 2004 y 2008, año en que fue nombrada embajadora de España ante la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Ha sido diputada en la VI, VIII, IX y X legislaturas y ha sido también asesora en la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Fue nombrada miembro del Consejo de Seguridad Nuclear en diciembre de 2012.

Entrevista a Cristina Narbona, consejera del CSN

“Fukushima ha propiciado medidas adicionales de seguridad, que todas las centrales nucleares están incorporando”

■ Ignacio Fernández Bayo, periodista de ciencia y director de Divulga

Con su amplísima experiencia en cargos relevantes, Cristina Narbona presume de “vocación por lo público” y de haber rechazado por ello tentadoras ofertas para entrar en la iniciativa privada. Y dentro de esa vocación por lo público, afirma que estar en un organismo regulador como el CSN es un hito en su historial, “porque se trata nada más y nada menos que de garantizar la seguridad nuclear y la protección radiológica, a lo que concedo un enorme valor”. Hija de periodistas, domina con soltura la relación con los medios y se muestra dotada para la comunicación y la síntesis. Sobre su papel en el Pleno del Consejo, defiende con firmeza los valores de la confrontación de

ideas, desde la objetividad y los argumentos técnicos.

PREGUNTA: *Ha ocupado responsabilidades públicas muy variadas, ¿en qué se diferencia de ellas la de consejera del CSN?*

RESPUESTA: Cada responsabilidad es distinta, pero todas tienen algo en común, que es el servicio a los ciudadanos. Y he tenido en mi experiencia anterior algunas responsabilidades análogas a las actuales, como la gestión de los riesgos. Siendo ministra de Medio Ambiente me tocó enfrentarme con algunos muy importantes, como las obras hidráulicas en España, y todavía hoy algunas no disponen de plan de emergencia. La regulación normativa es otro elemento común, ya que aquí se

hacen guías e instrucciones, de obligado cumplimiento u orientativas, y como ministra contribuí a la elaboración de doce leyes y no sé cuántos decretos. Establecer un marco jurídico de regulación me ha hecho aprender mucho sobre el Estado de derecho y la atribución de responsabilidades y derechos, que es lo que marca la calidad democrática de un país.

P: *Esa calidad democrática supone también la independencia de un organismo como el CSN.*

R: La independencia es absolutamente importante, un valor crucial, y no solo en este sino en todos los organismos reguladores, como la crisis internacional y el accidente de Fukushima han puesto de



manifiesto. Y entiendo esa independencia tanto de los Gobiernos como de los sectores empresariales regulados. La crisis es un fallo masivo en la gobernanza, tanto de las instituciones públicas como de las privadas, y en el caso de Fukushima ha quedado constancia en los informes del Parlamento japonés de que el accidente se habría podido producir incluso sin ningún fenómeno externo que lo desatara, porque había fallos muy importantes en la independencia y en el papel del regulador.

P: ¿Cómo era su percepción del organismo desde fuera?

R: Tuve cierta relación con el CSN cuando aprobamos en el año 2006 la ley de acceso a la información y la participación y acceso a la justicia en materia ambiental. Y he tenido a lo largo del tiempo varios momentos en que he trabajado en materia de energía con los presidentes y consejeros del CSN; aparte de que la seguridad nuclear es un tema que me preocupó desde los años setenta, así que no es nada que haya aparecido en mi vida ahora. Llevo casi tres años aquí y ha sido un tiempo de aprendizaje diario, algo fundamental para mí. Como lo ha sido en todas mis anteriores responsabilidades.

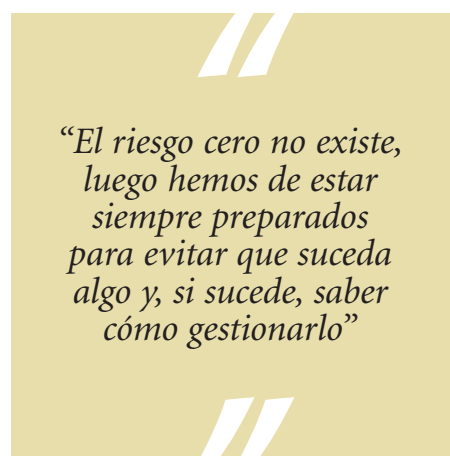
P: ¿Ha cambiado esa percepción al conocerlo por dentro?

R: Lógicamente ahora tengo una impresión mucho más ajustada a la realidad, sobre todo por el extraordinario valor que tiene su papel. Que un supervisor de seguridad funcione bien, sea independiente y prime el rigor es fundamental. Desde dentro mi opinión es que aquí hay un conjunto de magníficos profesionales y unas prácticas y unos procedimientos que hacen que el prestigio internacional del Consejo sea muy alto. Lo he comprobado en el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (NEA), en Washington durante la reunión de la RIC... Allí donde voy veo, y me satisface mucho comprobarlo, que el Consejo es reconocido

por su larga trayectoria, rigor profesional e independencia.

P: ¿Qué destacaría como principales fortalezas del CSN?

R: Prácticamente lo he contestado, porque pienso que la principal está en su equipo humano, las personas que lo forman; muchas de ellas con una larga experiencia en la casa. Eso es un valor pero también una ocasión para mejorar, porque cuando las personas desempeñan una labor durante mucho tiempo es importante instrumentar mecanismos de evaluación y ser capaces de objetivar cómo se com-



“El riesgo cero no existe, luego hemos de estar siempre preparados para evitar que suceda algo y, si sucede, saber cómo gestionarlo”

porta la organización.

P: Esos aspectos se evalúan en las revisiones del OIEA, como la que tuvo el CSN.

R: Las revisiones por el sistema de los *peer review*, algo que aprendí desde dentro cuando era embajadora de España ante la OCDE, son fundamentales. Es una forma de conocer mejor lo que se hace fuera, en un mundo cada vez más globalizado, donde la relación con instituciones internacionales y con países diferentes aporta valor al trabajo diario, y poder incorporarlo. Por supuesto tanto el OIEA como la NEA son referentes muy valiosos para mejorar continuamente.

P: No hay que dormirse en los laureles.

R: No, pero ni aquí ni en ningún sitio. Precisamente en la Administración Pública, el hecho de que los funcionarios tengan garantizada su permanencia es un

valor, porque da estabilidad, pero creo que debemos acompañar eso con la capacidad de medir los resultados e incentivar a quienes trabajan mejor. En España todavía podemos hacer un esfuerzo importante para medir resultados, analizar la evolución de las políticas, la rendición de cuentas, la *accountability*, que en el mundo anglosajón está muy instaurada, y en nuestra democracia, que es mucho más joven, está francamente ausente. Hay que introducir indicadores de progreso en las políticas públicas y mecanismos de auto-evaluación.

P: La renovación del personal del CSN es otra de las cuestiones que se suelen citar como una necesidad para el regulador.

R: De hecho uno de los objetivos prioritarios de este Pleno es sustituir a quienes se están yendo porque cumplen la edad de jubilación. Es una prioridad en la que el presidente ha jugado un papel muy positivo en el diálogo con la Administración, porque, pese al contexto que tenemos, ha conseguido que se reconozca el carácter excepcional de la tarea del Consejo y sacar, después de muchos años, una convocatoria para nuevas plazas. Hay que hacer un esfuerzo de formación e integración para que esta incorporación produzca sus frutos. No se trata solo de que entre nueva savia, sino de que no se pierda el conocimiento adquirido por las personas que se van, que van a ser bastantes en los próximos años, porque esa experiencia no está solo soportada por documentos accesibles sino también en la mente y en la historia de cada persona y hay que conseguir que se traspase a los nuevos técnicos.

P: ¿Qué otras mejoras deberían introducirse?

R: Creo que es necesario mejorar los mecanismos de comunicación, tanto interna como externa, porque, según los resultados de un estudio, recomendado por el Comité Asesor, que hemos realizado, la imagen del Consejo de Seguridad Nuclear no es buena. Hay muchísimo margen

para que se conozca y se valore mejor su labor en España. Nos conocen un poquito más los ciudadanos que están cerca de centrales nucleares, pero la mayoría desconoce nuestra labor y que, además de las centrales nucleares, hay miles de instalaciones que utilizan radiaciones ionizantes y que tienen que estar controladas, y que esa labor la hace el Consejo. Creo que será una de las cuestiones que en este Pleno seguiremos muy de cerca. Esta revista es un ejemplo de este empeño, para hacer entendibles materias tan complejas a un público muy amplio. Y otra herramienta fun-

damental es la web, que hemos mejorado recientemente.

P: *El accidente de Fukushima impulsó en Europa la puesta en marcha de planes de acción para mejorar la seguridad de las centrales nucleares, ¿cómo valora su implantación?*

R: Hay un antes y un después de Fukushima, porque queda muy claro que si eso sucedió en un país como Japón, tecnológicamente muy avanzado y con una democracia consolidada, no es posible mantener la idea del riesgo cero en materia nuclear. Y otra lección es el papel de

los reguladores y su independencia, por la vinculación del japonés con la administración y su condescendencia con las empresas. De estas grandes lecciones se han derivado planes para mejorar la seguridad de las plantas y considerar los fenómenos externos como posibles desencadenantes de problemas en las plantas. Ya se contemplaba, pero ahora damos más importancia a la protección física, a la gestión de las emergencias, a cómo descontaminar un área afectada por un accidente y a cómo contabilizar los costes. Y creo que es muy positivo porque, sin ninguna duda, en seguridad nuclear hoy estamos mejor preparados que hace cuatro años. Y en los próximos años estaremos todavía mejor.

P: *¿Eso significa que siempre hay que seguir mejorando aunque no exista el acicate de un accidente por medio?*

R: Exacto. Siempre es posible que pase algo, luego hemos de estar preparados para evitar que suceda y para que si sucede sepamos cómo gestionarlo. Una de las experiencias de la vida diaria aquí es la participación en simulacros. Creo que en esa materia también tenemos mucho que mejorar. En cómo los diseñamos y en cómo los gestionamos, porque el propio simulacro hace emerger agujeros todavía por perfeccionar.

P: *¿Existe el peligro de que se hagan de forma rutinaria?*

R: Sí, se puede entrar en la inercia del “hoy toca simulacro” y es fundamental que nos creamos que estamos en una emergencia real. Se trata de pensar qué decisiones habría que tomar si estuviéramos en esas circunstancias y cuál sería nuestra relación con las distintas instancias que participan.

P: *Hay dos temas controvertidos que hacen aparecer al CSN con frecuencia en los medios: la renovación de la autorización de funcionamiento a Santa María de Garoña y el Almacén Temporal Centralizado (ATC). En algunas reuniones dedicadas a ellos*



“No hay nada peor que quien se siente afectado por un riesgo crea que no le están contando la verdad”

PREGUNTA: *Usted ha llevado las negociaciones del acuerdo firmado recientemente entre el CSN y Portugal. ¿Ha sido complicado alcanzarlo?*

RESPUESTA: La relación con Portugal la hemos canalizado hacia un protocolo técnico con contenidos muy centrados en la gestión de las emergencias. Ha sido difícil llegar a la firma porque en Portugal no hay una entidad única, como el CSN, que se ocupe del abanico de temas relacionados con nuestra materia, sino tres. No era fácil, y debo destacar el papel de nuestro experto en relaciones internacionales, Alfredo de los Reyes, así como el de M^a Fernanda Sánchez Ojanguren, directora técnica de Protección Radiológica. Hemos tenido una ventana de oportunidad, con un Gobierno en Portugal muy sensible a este tema y a mí me ha ayudado mi propia experiencia anterior con los portugueses, con los que traté la gestión de las cuencas comunes, con muchos desencuentros y un final feliz, llegando incluso a gestionar conjuntamente la sequía de 2005. Yo recordaba la sensación que tiene Portugal de que de España solo le llega lo malo. En la relación bilateral la clave es crear confianza, algo que se apoya siempre en la transparencia y la comunicación. No hay nada peor que quien siente que puede estar afectado por un riesgo crea que no le están contando la verdad.

P: *¿Cuáles son los objetivos del acuerdo?*

R: El protocolo establece que haya un intercambio permanente de información. Vamos a hacer grupos de trabajo sobre distintos aspectos y creo que es muy útil para nosotros y también, claro, para los portugueses, que pueden respirar más hondo porque ahora tenemos unas herramientas de trabajo estructuradas, con vocación de ampliarse a otros temas. Vamos a intentar pasar del ámbito de la gestión de las emergencias a otros más ambiciosos, construyendo a partir de este primer protocolo y tenemos en marcha la firma de un memorándum de entendimiento y aunque me temo que en esta legislatura no va a poder ser, están los mimbres preparados, tanto en materia de I+D como en otros temas.

P: *Proyectos de investigación conjuntos y transferencia de la experiencia española.*

R: Aunque ellos no tengan centrales nucleares lógicamente tienen residuos de las actividades de los hospitales y también afrontan el desmantelamiento de un reactor experimental de pequeña dimensión que operaba el Instituto Tecnológico de Lisboa. Nosotros estamos adquiriendo una experiencia interesantísima a escala internacional con Zorita y ese es uno de los aspectos que han surgido, para estudiar el desmantelamiento y el transporte desde el punto de vista de los materiales y la tecnología. ►

usted ha votado de forma diferente que el resto del Pleno. ¿Por qué?

R: Está muy explicado en los votos particulares, que son públicos y están accesibles para cualquiera. Creo que si se ha diseñado un órgano colegiado y no de otra naturaleza es precisamente para que se puedan manifestar diferencias de criterio, y en ese sentido creo que es muy necesario insistir en la neutralidad de todos los que formamos el Pleno. Algunos de los que forman este Pleno o de Plenos anteriores son fervientes defensores de la energía nuclear; en mi caso no es así y eso no significa que yo sea menos neutral que los demás. Creo que nuestras decisiones tienen que ser ajenas al planteamiento que cada uno tenga respecto de la oportunidad o no de que haya más centrales nucleares o me-

nos. Yo eso lo he tenido claro desde el primer momento, por eso mis votos están basados siempre en argumentos de carácter técnico y jurídico, en las buenas prácticas y en los procedimientos que están en vigor en el Consejo de Seguridad Nuclear y en las recomendaciones de los organismos internacionales. En ningún caso en un posicionamiento contrario a la energía nuclear, sino en lo que creo que honestamente debe ser mi papel, cómo yo interpreto el marco en el que nos tenemos que mover de nuestras propias normas y prácticas y en ninguna otra consideración.

P: *Recientemente se ha firmado un acuerdo con la Agencia Estatal de Meteorología en el que usted ha tenido un papel determinante. ¿En qué consiste?*

R: Con la agencia hay una larga

relación, lógicamente, porque las condiciones meteorológicas son fundamentales para proteger las centrales nucleares y las instalaciones. Pero valía la pena reforzarlas; primero, porque antes era un organismo autónomo y ahora una agencia estatal y había que acomodar jurídicamente la relación; y segundo, porque la evidencia de los efectos del cambio climático es cada vez mayor, y sus consecuencias son preocupantes. Los primeros torneos que se produjeron en España me cogieron a mí siendo ministra de Medio Ambiente y estos y otros fenómenos extremos no han hecho más que incrementarse, como consecuencia del aumento de las temperaturas, y pueden incidir sobre cuestiones como la refrigeración de las centrales y la disponibilidad de agua.



Cristina Narbona e Ignacio Fernández Bayo, durante la entrevista.

Tenemos que conocer mucho mejor lo que está ocurriendo y por eso, en el marco de este acuerdo, vamos a desarrollar programas conjuntos.

P: *Hacer investigaciones, no solo recibir la información meteorológica.*

R: Claro. Vamos a trabajar con una visión más estratégica en torno a cuestiones que ahora pueden parecer anecdóticas, pero que pueden ir a más y en esa perspectiva creo que la relación del Consejo con la Agencia es muy importante. Yo he impulsado ese convenio, porque dentro del Pleno nos repartimos tareas y esta es una de las que tengo asignadas.

P: *Otra de ellas es la relación con la Empresa Nacional del Uranio.*

R: Enusa es un regulado *singular*, porque es una instalación nuclear pero no una central y tiene ciertos riesgos y la obligación de gestionarlos. Y es también singular porque es una empresa pública. Pero para el CSN no hay elementos diferenciadores y tenemos que ser, y somos, tan exigentes como con los demás regulados. Hace poco he visitado la fábrica de combustible de Juzbado y los terrenos de la mina Quercus, que están siendo restaurados. Para mí ha sido una visita interesantísima porque creo que es fundamental

ver de cerca las instalaciones y a las personas que trabajan y cómo desarrollan la actividad.

P: *Usted también participa en el Comité de Actividades Reguladoras de la NEA ¿En qué consisten?*

R: Siendo embajadora ante la OCDE lo era también ante la NEA, puesto que forma parte de aquella, así que pude conocer sus actividades. Este comité de la NEA tiene dos reuniones al año y es donde los organismos reguladores hacemos una puesta en común de buenas prácticas en diferentes campos, como la experiencia operativa, la gestión de accidentes y la comunicación, y eso nos permite aprovechar la experiencia de otros países para nuestra propia actividad reguladora. En este Comité cuento con la participación activa de Antonio Munuera, director técnico de Seguridad Nuclear y de varios expertos del CSN. He seguido de cerca la elaboración de un libro verde sobre la eficacia de los reguladores y otro, que saldrá ahora, sobre la cultura de seguridad en los propios organismos, porque la tenemos muy protocolarizada en las centrales nucleares, pero en el propio Consejo cabe mejorarla aún, por ejemplo, construyendo indicadores y mecanismos de autoevaluación.

P: *¿Se está consiguiendo homogeneizar en el ámbito europeo la normativa y los procedimientos?*

R: Yo creo que a escala europea ha habido un salto muy notable tras Fukushima en cuanto al reforzamiento del papel de las directivas europeas en materia de seguridad nuclear, gestión responsable del combustible usado, e incluso es previsible que tengamos una sobre gestión de emergencias y sobre nuestras relaciones con países limítrofes. El OIEA ha destacado en la última reunión como buena práctica el que España haya hecho un convenio de colaboración con Portugal, porque es primero un ejemplo de colaboración transfronteriza y además entre un país con centrales nucleares y otro que no las tiene. Cada vez más nos llega desde distintas instancias esa necesidad de cooperar entre países y de tener elementos de referencia comunes, respetando, obviamente, la independencia de los reguladores de cada país, pero creando normas comunes a las que nos tenemos que adaptar.

P: *Otra cuestión importante para el futuro del CSN es la I+D.*

R: Es algo fundamental. Entre los encargos que tengo en el Pleno está también el de supervisar la Cátedra Goded de la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid, una de las cuatro que tiene el Consejo. El trabajo del Consejo con las universidades refuerza el avance del conocimiento en nuestro ámbito y es un tema que vale la pena darlo a conocer. El apoyo a la investigación va a ir a más, y es una cuestión que está llevando muy bien la actual vicepresidenta. Se está dando paso a la colaboración con muchas instancias nacionales e internacionales para reforzar el papel del Consejo como impulsor y como parte de procesos de investigación. Se han revisado los procedimientos internos para decidir en qué proyectos de I+D entrar o no y cómo hacerlo, estableciendo unas pautas para que exista el control adecuado.



Los ensayos no destructivos

La importancia de los ensayos no destructivos (END) en la sociedad se considera de gran relevancia, dada la aportación que tienen en aspectos de calidad y seguridad en multitud de sectores industriales, entre los que cabe destacar el nuclear, el aeronáutico, el petroquímico, la construcción naval, etc. Su principal contribución es que han permitido garantizar la calidad de cualquier producto fabricado o verificar su estado en servicio, al tratarse de técnicas que no deterioran ni destruyen el componente analizado, determinando sus dimensiones, características y estado de las propiedades del material y, por supuesto, la presencia o no de defectos que pudieran afectar a su integridad y, por tanto, al cumplimiento de las funciones propias asignadas.

El desarrollo de técnicas de inspección mediante END tuvo un gran impulso durante la segunda guerra mundial, aunque su principal avance se ha producido en los últimos años como consecuencia de las necesidades y exigencias generadas para garantizar la seguridad en la industria nuclear y, como no, también en la industria aeronáutica. Tampoco se debe olvidar el gran avance experimentado de este tipo de técnicas en otros sectores, como el sanitario, que ha permitido la mejora del diagnóstico del paciente (ecografías, etc.).

El artículo se centrará en los usos de los END en el ámbito nuclear, que no es otro que la inspección de las estructuras y componentes de una central nuclear,

incluyendo los elementos combustibles (como primera barrera de seguridad), para garantizar la calidad del proceso de fabricación y, por supuesto, para conocer el estado de los mismos durante su servicio.

Los métodos de END pueden clasificarse de diversas maneras, aunque usualmente se clasifican en función del tipo de defecto o característica que pretenda ser detectada. En base a esto se agrupan en: examen visual, superficial o volumétrico, siendo los ensayos más conocidos: inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía, ultrasonidos y corrientes inducidas.

Un aspecto muy importante a considerar en los END es que se debe garantizar la correcta ejecución de los mismos, así como la fiabilidad de sus resultados, razón por la que es imprescindible que los procesos se realicen de acuerdo con procedimientos basados en criterios y requisitos definidos en la normativa aplicable y que sean ejecutados por personas que dispongan de las capacidades y los conocimientos exigidos para cada caso.

En relación con este aspecto, señalar que recientemente se ha finalizado el proceso de validación de sistemas de inspección mediante ultrasonidos y corrientes inducidas de acuerdo con una metodología desarrollada en España, que incluye los procedimientos así como la cualificación del personal que los ejecuta.

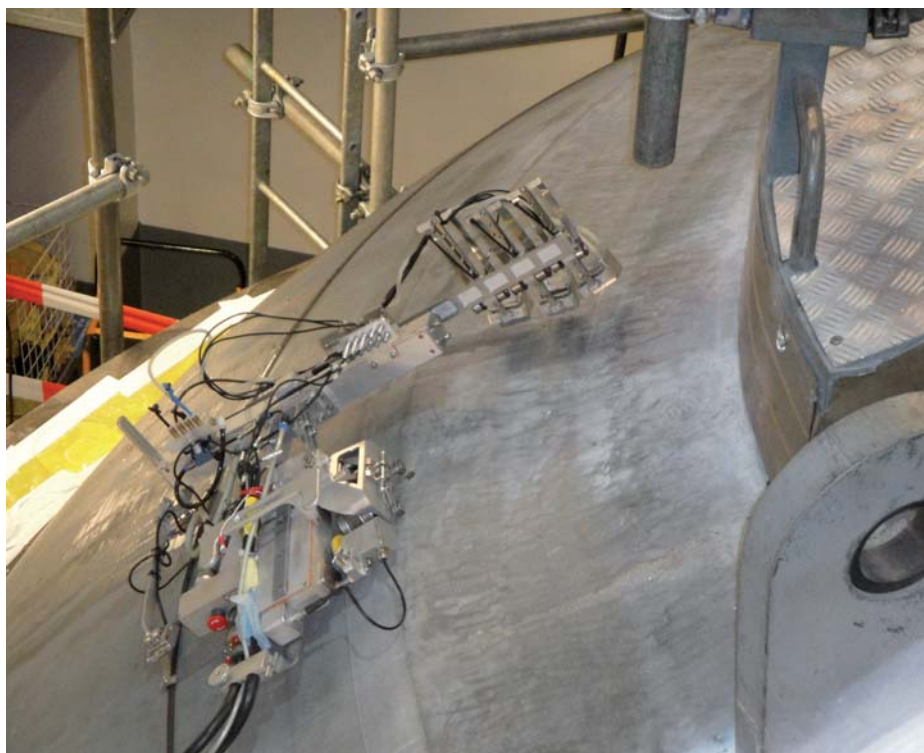
■ Texto: **Carlos Mendoza Gómez** | jefe del Área de Gestión de Vida y Mantenimiento del CSN ■

El uso de los ensayos no destructivos (END) surge de la necesidad de conocer el estado de los objetos sin utilizar los mismos. Este tipo de prácticas son muy antiguas, y se han utilizado técnicas en base a los conocimientos disponibles en cada momento. Los primeros END conocidos como tal, eran muy rudimentarios y consistían, básicamente, en la realización de exámenes visuales, en algunos casos con ayuda de lentes de pocos aumentos, para verificar el estado del ma-

terial y, en otros, simplemente llenando con algún fluido un componente para detectar fugas en el mismo, o en el uso de ensayos auditivos golpeando partes metálicas con un martillo con el fin de conocer el estado del equipo mediante las diferencias que se producían en los sonidos. Estas técnicas han evolucionado a medida que se iba disponiendo de mayores conocimientos en la física y en otras materias y, por supuesto, como consecuencia de la demanda existente en muchos campos,

desde el industrial hasta la medicina, de disponer de técnicas que permitiesen conocer, de una manera no invasiva, desde la caracterización del estado de un material hasta el diagnóstico de un paciente.

¿Cómo se puede definir, por tanto, los ensayos no destructivos? Como procesos repetitivos aplicados a los materiales de las estructuras o componentes, de una manera no invasiva, que permiten verificar la calidad de los elementos inspeccionados, localizando y evaluando los defec-



Inspección automática por UT de la tapa de la vasija.

tos en la superficie o en el interior de su material, así como comprobar alguna de las características mecánicas de los mismos.

Los métodos de ensayos no destructivos son diversos, empleándose técnicas diferentes en base a los requisitos de calidad exigidos, así como a parámetros relacionados con el tipo de material inspeccionado, su geometría, tipo de defecto postulado, accesibilidad, etc.

La clasificación de los END se puede realizar de muy diversas formas. Una de ellas atiende a los principios físicos en los que se basan los ensayos y otra, más general, a las características del componente que se va a examinar (materiales, geometría, etc.), al tipo de defecto que se ha de localizar y a las ventajas y desventajas de cada una de las opciones posibles. De acuerdo con estos criterios, pueden agruparse en: exámenes visuales, superficiales y volumétricos.

Exámenes Visuales

El examen visual consiste en la observación directa o remota de las superficies accesi-

bles de soldaduras, materiales base, componentes o sistemas en busca de fugas, anomalías, condiciones superficiales, cambios en las características físicas u otras indicaciones que revelen el estado general mecánico y estructural de las partes objeto de inspección. En ocasiones, mediante la realización de este examen por sí solo no es posible obtener conclusiones definitivas del estado real del elemento examinado, por lo que es necesario que vaya acompañado de inspecciones adicionales mediante otras técnicas.

Existen dos formas para efectuar un examen visual: visión directa y visión remota.

La inspección visual directa es la que se realiza sobre un objeto o superficie a una distancia accesible a los ojos del inspector sin necesidad de medios de aproximación; es decir, únicamente dependerá de dos parámetros: la distancia máxima a la que debe colocarse el observador y el ángulo de visión. En cuanto a la inspección visual remota es la que por razones de inaccesibilidad (radiación, in-

mersión, localización, etc.) requiere el uso de medios auxiliares tales como espejos, lentes de aumento, endoscopios, cámaras de TV, etc.

Este tipo de exámenes se utiliza ampliamente para verificar el estado de las estructuras y de los soportes, así como de las condiciones de las superficies internas y externas de un elevado número de tuberías y componentes. Sin embargo, el uso más relevante de los exámenes visuales corresponde a los programas de inspección de internos de la vasija del reactor que, actualmente, se están desarrollando en base a las recomendaciones recogidas en los guías de EPRI (Electric Power Research Institute), lo que ha exigido la implantación de mejoras en las técnicas de inspección visual remota, como el uso de cámaras con mayor resolución.

Además de este tipo de exámenes visuales, existe otro cuyo objetivo es localizar evidencias de fugas en los componentes, bien a través del material o bien a través de empaquetaduras, uniones embriadas, etc., durante la realización de una prueba de presión del componente.

La ventaja del examen visual es que es muy simple de realizar y permite la inspección de superficies amplias, de difícil configuración y acceso.

Como desventaja de dichos exámenes se debe indicar que la fiabilidad de los mismos depende en gran medida de la habilidad, experiencia y agudeza del ejecutor del examen, y, en algunos casos, de la calidad de las ayudas ópticas utilizadas.

Exámenes superficiales

Los exámenes superficiales son aquellos métodos que pueden proporcionar información no solo del estado de la superficie inspeccionada, sino también, en algunos casos, de la zona situada a cierta profundidad por debajo de ella. Los métodos de examen superficial más utilizados son: líquidos penetrantes, partículas magnéticas y corrientes inducidas.

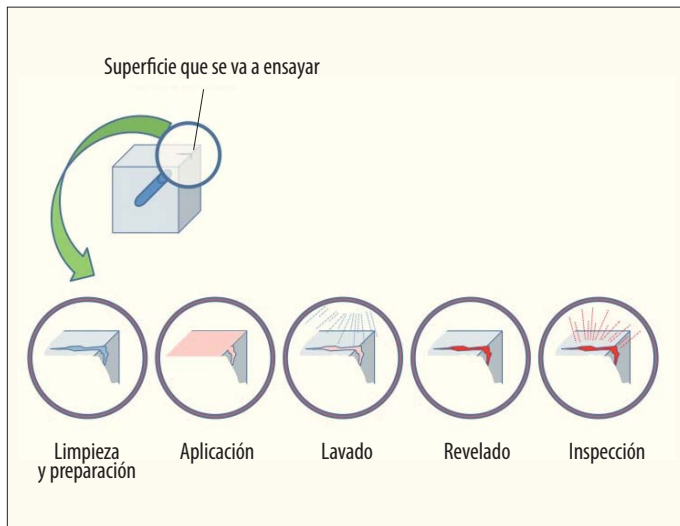


Figura 1. Proceso de líquidos penetrantes.

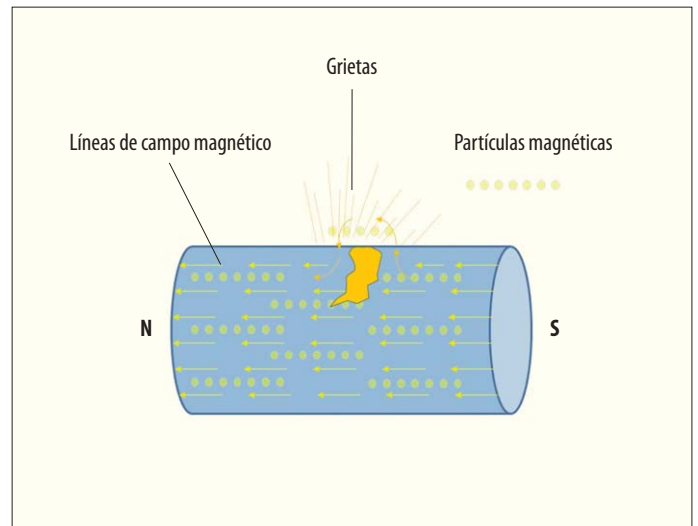


Figura 2. Partículas magnéticas.

Líquidos penetrantes

Es un tipo de ensayo que se utiliza para detectar e identificar discontinuidades que afloran a la superficie, tales como grietas, porosidad, pliegues, solapes, defectos laminares, entre otros.

El proceso consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente (penetrante) sobre la superficie a inspeccionar, el cual penetra en cualquier discontinuidad que pudiera existir en ella debido al fenómeno de capilaridad. Después de un determinado tiempo, se remueve el exceso de líquido y se aplica un revelador, de color diferente al líquido penetrante, el cual absorberá el líquido que haya penetrado en las discontinuidades abiertas a la superficie, quedando marcado sobre la capa del revelador el contorno de las discontinuidades presentes en la misma (figura 1).

Este ensayo se puede realizar sobre cualquier material no poroso, si bien en materiales ferromagnéticos es más conveniente utilizar el ensayo por partículas magnéticas.

Las técnicas de examen por líquidos penetrantes (LP) se pueden clasificar en dos, de acuerdo al tipo de penetrante aplicado: visibles y fluorescentes. Cada una de estas puede ser dividida, a su vez, en tres

subtécnicas: la que utiliza líquidos removibles con agua, la que utiliza líquidos removibles con disolvente y la que utiliza líquidos postemulsificables. Finalmente, cada técnica deberá utilizar el revelador más adecuado para el proceso: revelador seco, en suspensión acuosa o no acuosa, y en solución.

Este método de inspección tiene múltiples aplicaciones, debido, principalmente, a sus ventajas, tales como:

- El proceso de inspección es sencillo, totalmente manual y no representa un problema la configuración de las piezas que se van a inspeccionar.

- Es un método con buena sensibilidad en la detección de discontinuidades que afloran a la superficie, muy económico y que requiere pocas horas de capacitación de los inspectores.

Aunque, como cualquier otro método tiene también sus limitaciones:

- Ámbito de aplicación reducido a defectos abiertos a la superficie, en materiales no rugosos.

- Es relativamente sensible al acabado superficial y a los tratamientos superficiales (cromado, anodizado, etc.).

- No proporciona registro permanente del resultado final del ensayo.

- Los resultados obtenidos solo son útiles como indicación de defectos, ya que

no es posible un dimensionamiento exacto de estos.

Partículas Magnéticas

Es un método de ensayo que permite detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos como el hierro, el cobalto y el níquel. Debido a su baja permeabilidad magnética no se aplica ni en los materiales paramagnéticos (como el aluminio, el titanio o el platino) ni en los diamagnéticos (como el cobre, la plata, el estaño o el zinc).

El proceso de este ensayo consiste en someter la pieza o área objeto de inspección a un campo magnético. Las líneas del campo magnético que recorren la pieza pueden sufrir distorsiones como consecuencia de la existencia de discontinuidades del material perpendiculares a estas. Las zonas en las que se producen estas alteraciones del campo magnético, se comportan como imanes, debido a las fugas de campo generadas, lo que hace que cualquier material magnético o ferromagnético normalmente en forma de limaduras (partículas magnéticas) aplicado sobre la superficie sea atraído a dicha zona (figura 2).

Es decir, la presencia de discontinuidades superficiales o sub-superficiales

en el material se evidenciará por la acumulación de las partículas magnéticas aplicadas.

El ensayo puede aplicarse de diferentes maneras, asociadas a cada una de las variables o parámetros del ensayo, que dependen del tipo de pieza que se ha de inspeccionar (naturaleza del material, configuración, proceso de fabricación, etc.) y del tipo y localización del defecto postulado. Para ello se deberá definir el tipo de corriente, el tipo de partículas y el modo de aplicación, la dirección del campo magnético inducido en la pieza, la sensibilidad y el tipo de equipo.

En general, existen dos formas de aplicación de las partículas magnéticas: por vía húmeda o por vía seca. Así mismo, existen dos tipos de partículas magnéticas: aquellas que son visibles con luz blanca natural o artificial y aquellas cuya observación debe ser bajo luz ultravioleta, conocidas comúnmente como partículas magnéticas fluorescentes.

Las etapas básicas que se siguen en cualquiera de los procesos de examen por partículas magnéticas son: limpieza de la pieza para la eliminación de materias que puedan enmascarar las discontinuidades, magnetización de la pieza con imán permanente, electroimán o paso de corriente a través de la pieza, aplicación de laca

de contraste y de partículas magnéticas y desmagnetización final.

Este ensayo tiene las siguientes ventajas:

— Es un método rápido, simple y económico, y que requiere de un menor grado de limpieza que los LP.

— Permite detectar defectos en el material que no afloran a la superficie.

— Permite inspeccionar piezas con una capa fina de pintura.

En cuanto a las limitaciones de este método, se deben citar:

— El método de ensayo está limitado a materiales ferromagnéticos.

— Aunque es capaz de detectar discontinuidades subsuperficiales, las garantías no son elevadas por su baja capacidad de penetración.

— Requiere el empleo de energía eléctrica.

— Requiere conocimientos sobre el tipo de defecto buscado, dado que solo se detectan los que se encuentran perpendiculares al campo.

— Requiere desmagnetización.

Corrientes Inducidas

Este tipo de ensayo consiste en la inducción de corrientes de *Foucault* o corrientes inducidas (CI), sobre un material metálico, en presencia de una bobina a través

de la cual circula una corriente eléctrica.

Su fundamento teórico se basa en que una bobina aislada, alimentada por una corriente alterna de frecuencia conocida, crea un campo magnético variable (campo de vacío) que cambia de dirección cada vez que cambia el sen-

tido de la corriente circulante. Si en las proximidades del campo magnético de vacío hay un material conductor (pieza a inspeccionar), dicho campo penetra en el material y crea, por efecto de la inducción magnética, unas corrientes circulares y cerradas, perpendiculares a las líneas del campo inductor, y que a su vez generan otro campo magnético, llamado campo de reacción, opuesto al campo de vacío. La composición de ambos campos modifica la impedancia de la bobina (figura 3).

Por tanto, el ensayo consiste en acercar una bobina (a través de la cual circula una corriente) a una superficie metálica induciendo unas corrientes en ella que, en presencia de heterogeneidades debido a factores como grietas, fisuras y cambios de dimensiones, produce una modificación de su intensidad, provocando una variación en la impedancia de la bobina. Por ello, se establece una relación biunívoca defecto-variación de impedancia.

El efecto electromagnético en el que se basa este ensayo es conocido desde mediados del siglo XIX, si bien no fue hasta 1930 cuando, gracias a los estudios del doctor Friederich Foster, se produjo el primer avance en la aplicación de esta técnica, mediante el desarrollo de un equipo capaz de representar las variaciones producidas por las CI. Posteriormente, a partir de 1975, este ensayo ha conocido un gran avance no solamente en el desarrollo de sondas, sino también en equipos y *software* de análisis de señales, lo que ha permitido un amplio campo de aplicación.

Este método de ensayo se utiliza, fundamentalmente, para la vigilancia de tubos metálicos de pared fina, como los haces de tubos de intercambiadores de calor y generadores de vapor, debiéndose sus principales mejoras a la aplicación en estos últimos.

En los últimos años, debido a la sensibilidad de las sondas de corrientes inducidas, la aplicación de esta técnica se ha extendido a otros usos para caracterizar el

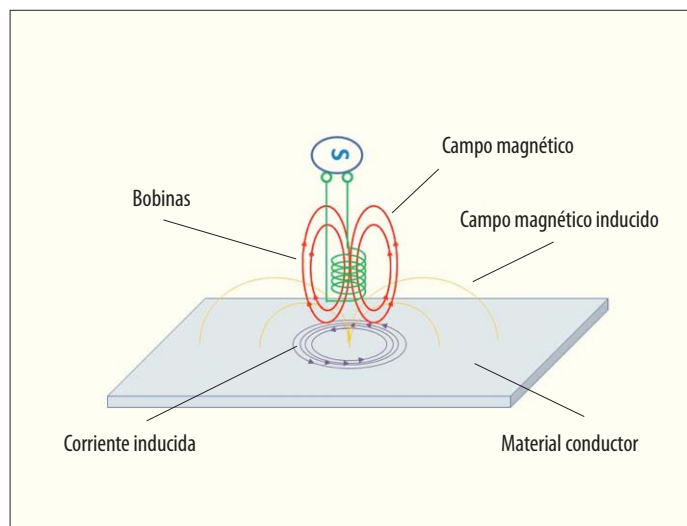


Figura 3. Corrientes inducidas.

estado de la superficie de examen, y es muy habitual en la realización de inspecciones de *cladding*, en la medición de expansionado de placas tubulares y, en general, en la inspección de muchos componentes del primario (elementos combustibles, envoltura del núcleo, penetraciones de barras de control, etc.).

Al igual que para otros métodos, su aplicación tiene ventajas y limitaciones. Entre las primeras destaca la obtención casi instantánea de la señal de registro y la automatización de la inspección, que permite altas velocidades de examen. Entre las segundas, que este método requiere de otro tipo de ensayo para la caracterización completa del defecto.

Exámenes volumétricos

Los exámenes volumétricos son aquellos que pueden proporcionar información sobre la integridad del material en el espesor completo de la pieza que se examina. Los métodos utilizados como tales son: el examen radiográfico, el examen ultrasónico y la emisión acústica. Dentro de este grupo, también se podría incluir uno de los exámenes antes descritos: las corrientes inducidas, al menos en algunas aplicaciones, como es el caso de la inspección de los tubos de los generadores de vapor.

Radiografía

La radiografía es uno de los métodos más antiguos y de mayor uso en la industria, y se basa en la interacción entre la materia y la radiación electromagnética o de partículas.

El proceso consiste en bombardear el elemento a inspeccionar mediante un haz de radiación ionizante (rayos X o γ). La parte de radiación que no es absorbida por dicho elemento, incide sobre una placa impregnada de una sustancia radio-impressionable, generando una imagen latente, que posteriormente es revelada mediante un procedimiento fotográfico convencional.

Las diferencias de densidad, espesor y composición en el elemento para inspeccionar, provocada por la existencia de heterogeneidades presentes en él, implican variaciones en la absorción de la radiación, lo que se traduce en diferencias de densidad fotográfica (intensidad de sombra) de la película obtenida.

En la actualidad, dentro del campo de la industria existen dos técnicas comúnmente empleadas para la inspección radiográfica: radiografía con rayos X y radiografía con rayos gamma.

La diferencia entre ambas técnicas es el origen de la radiación utilizada, ya que mientras los rayos X son generados por un alto potencial eléctrico, los rayos gamma se producen por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo. Las fuentes radiactivas que se suelen utilizar en este caso son: iridio-192, cobalto-60, cesio-137 y tulio-170.

Este método de ensayo se utiliza, muy comúnmente, en los procesos de fabricación o de construcción. Sus principales ventajas son las siguientes:

- Puede emplearse con la mayoría de materiales.
- Proporciona una imagen de la “naturaleza interna” del objeto ensayado, en un soporte permanente (película).

— Es relativamente rápido y automatizable.

Y como limitaciones pueden citarse estas:

- Necesita un espacio para laboratorio.
- El examen de grandes piezas es lento y precisa fuentes muy potentes.
- Ciertos tipos de defectos son difíciles de detectar, como los de tipo laminar.
- Dificultad de posicionamiento en geometrías complejas y zonas poco accesibles.

— No permite la caracterización en profundidad de los defectos.

— Obliga a tomar medidas especiales de protección radiológica.

— Requiere personal altamente capacitado, cualificado y con experiencia.

Ultrasonidos

El método de ensayo por ultrasonidos (UT) se basa en la aplicación de ondas elásticas en forma de impulsos cortos que se propagan a través del material que se inspecciona, y posteriormente se analizan las ondas reflejadas.

Estas ondas tienen las mismas características que las ondas sonoras; es decir, necesitan un medio a través del cual transmitirse (no se transmiten en el vacío), si bien en este caso la frecuencia está por encima del campo de frecuencias audibles (20 Hz a 20 kHz), de ahí el nombre de ultrasonidos. La frecuencia más usual en las exploraciones de materiales metálicos se encuentra por encima de 1 MHz.

Los ultrasonidos utilizados en inspección se basan en el efecto piezoeléctrico, según el cual ciertos cristales expuestos a una excitación son capaces de emitir una onda de presión ultrasónica. Esta onda, generada en un elemento del equipo llamado palpador y gracias a un medio que facilite su transmisión (agua, acoplante, etc.), se propaga a través del material que se ensaya de dos modos distintos: como onda longitudinal y como onda transversal, con características diferentes. Estas ondas sónicas vuelven reflejadas hacia el cristal, como consecuencia del rebote que se produce en la pared opuesta o por algún tipo de reflector (grieta, etc.) y se convierten en impulsos eléctricos que permiten, con el equipo y su adecuada calibración, la localización y caracterización de las discontinuidades existentes dentro del volumen de material ensayado (figura 4).

Aunque la clasificación más general de palpadores es: palpadores normales, de inmersión, angulares y de doble cristal, los avances en esta técnica de examen son amplios, lo que ha permitido el desa-

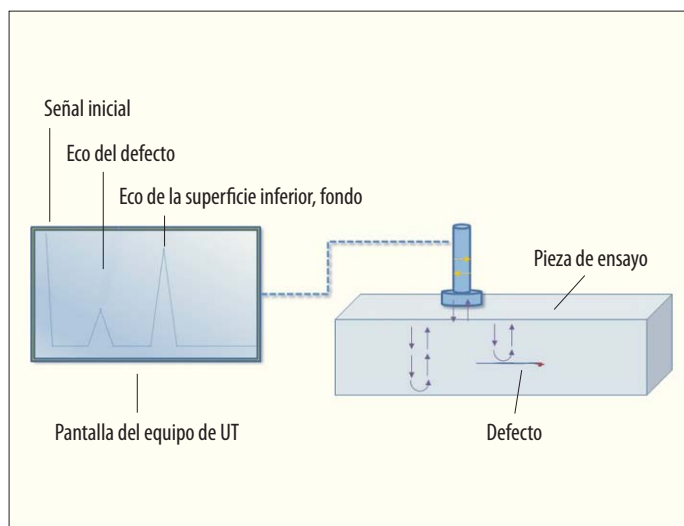


Figura 4. Esquema de un examen por ultrasonidos.



Equipo mecanizado de inspección de vasija.

rollo de otros tipos de palpadores, como los piezo compuestos, que actualmente son utilizados en diferentes aplicaciones.

En los últimos años se están produciendo grandes avances en el desarrollo de nuevas tecnologías. Entre ellos se encuentra la tecnología *Phased Array* que tiene la capacidad de modificar electrónicamente las características del palpador (distancia focal, ángulo del haz y forma del haz), permitiendo que con un solo palpador puedan ser inspeccionadas zonas para las que antes se necesitaba un gran número de palpadores.

Las ventajas de este método son muchas. Destacan la versatilidad para su utilización en la inspección de diferentes configuraciones, su sensibilidad y el permitir su automatización y registro, por lo que esta técnica es la más utilizada para la inspección de componentes en servicio y, por tanto, la que más ha reflejado el proceso de optimización de las técnicas.

Calificación y certificación

Los procedimientos de ensayos no destructivos son los documentos esenciales donde se describen, básicamente, “a qué” componentes aplican, “cómo” se deben ejecutar los ensayos y “qué” criterios de aceptación son aplicables para la caracterización de las indicaciones. De

modo general, los procedimientos recogen los requisitos de las normas o códigos de inspección aplicables en cada caso, tales como el ASME, ASTM, API, y AWS entre otros, con el fin de asegurar su correcta realización.

Sin embargo, como se puso de manifiesto en algunos de los programas de investigación realizados sobre la capacidad de los procedimientos de ultrasonidos, muchos de ellos necesitan ser optimizados para garantizar la fiabilidad de los ensayos, es decir, asegurar su repetibilidad y la capacidad de detectar y caracterizar los defectos.

Como consecuencia de ello, en 1989 se publicó por primera vez el Apéndice VIII de la Sección XI del código ASME, que define los requisitos de validación de los procedimientos de ultrasonidos aplicables a componentes y tuberías del circuito primario de las centrales nucleares. A partir de ese momento, tanto en Estados Unidos como en la Unión Europea, se lanzaron diferentes iniciativas encaminadas a la implantación de dichos requisitos, dando lugar a dos metodologías de validación: la americana, basada en demostraciones prácticas; es decir, mediante la realización de exámenes sobre maquetas con defectos representativos; y la otra, basada en justificaciones técnicas, consistente en

aportar evidencias técnicas sobre la capacidad de detección de la técnica.

En España, a través de la patronal del sector eléctrico, Unesa, y con la participación del CSN, se desarrolló la metodología española de validación de sistemas de inspección en servicio, cuyo resultado fue la metodología de validación española Unesa CEX-120, basada en los principios establecidos por ENIQ (European Network for Inspection Qualification), que fue aceptada por el CSN.

Otro aspecto importante para garantizar la calidad de los ensayos es que el personal que los realice deberá disponer de los conocimientos, habilidad y capacidad para ejecutar los END y evaluar sus resultados. Por ello, quienes los realicen requieren un certificado de acuerdo con las principales normas aplicables para la calificación y certificación del personal que realiza los END, tales como las normas SNT-TC-1A o ANSI/ASNT CP-189, EN-ISO-9712, u otras semejantes.

En relación con este aspecto, el CSN editó, en febrero de 2000, la guía de seguridad 10.10, en la que se definen los criterios que se deben seguir para la calificación y certificación del personal que realiza END, la cual actualmente está en fase de revisión. ©

Fotografías cedidas por Tecnatom.



Vista aérea de las nuevas instalaciones del Hospital Universitario Central de Asturias.

La renovación del Hospital Universitario Central de Asturias ha permitido dotar del más moderno equipamiento a sus servicios de radioterapia y radiodiagnóstico

En la vanguardia de la tecnología

Desde que el centro sanitario del Principado de Asturias fue inaugurado en junio del pasado año han sido atendidos miles de pacientes en sus servicios de Medicina Nuclear, Radioterapia y Radiodiagnóstico.

Unas instalaciones de última generación y de especial relevancia que ponen al servicio del ciudadano la más moderna tecnología. ■ Texto: **Pablo Ramos** | periodista científico ■

Hace poco más de un año estrenó nueva ubicación el Hospital Universitario Central de Asturias (HUCA). El traslado fue aprovechado para mejorar sus instalaciones en todos sus servicios, gracias a una inversión de 295 millones de euros, lo que ha convertido a este centro sanitario en toda una referencia tecnológica a nivel nacional. Y entre estos equipamientos avanzados se encuentran dispositivos como los nuevos aceleradores lineales de última generación para tratamientos oncológicos en radioterapia, equipos combinados SPECT/CT y PET/CT, los aparatos de resonancia magnética de alto campo y los TC multicorte de alta resolución, que permiten

mejorar el diagnóstico por imagen. “Existen muy pocos centros en España que dispongan de estas avanzadas tecnologías”, señala el doctor Miguel Javier Rodríguez, director del HUCA.

En concreto, los tres aceleradores lineales han aportado al servicio que el hospital ofrece a los ciudadanos un notable salto de calidad. “Son aceleradores que permiten realizar tratamientos muy avanzados, con un mejor control del tumor al ser capaces de administrar una radiación más alta y eficaz, y mejoran la calidad de vida de los pacientes al producir muchos menos efectos secundarios”, señala el doctor Luis Olay, jefe del Servicio de Oncología Terapéutica del HUCA.

Estas tres nuevas unidades, instaladas por la empresa Varian por un coste de 13,6 millones de euros, son un modelo Novalis Tx y dos Clinac IX, que incorporan técnicas de tratamiento muy novedosas, menos invasivas y seguras para los pacientes. Llevan ya funcionando a pleno rendimiento desde hace más de un año. “Gracias a estos aceleradores y a la radioterapia que realizamos, tratamos a una media de 2.000 pacientes al año”, explica Olay.

El equipamiento utilizado en los servicios de Radioterapia y Medicina Nuclear dispone de emisores de radiación ionizante de alta energía y de fuentes radiactivas no encapsuladas de alta activi-

dad. Estos dispositivos son considerados como instalaciones radiactivas de segunda categoría, por lo que están sometidos a una estricta regulación en materia de protección radiológica.

“Todos los profesionales de ambos servicios tienen que disponer de una formación adecuada acreditada por la correspondiente licencia emitida por el Consejo de Seguridad Nuclear. Este organismo, se encarga de autorizar la construcción y la puesta en marcha de estas instalaciones, y posteriormente, realiza controles periódicos de su funcionamiento”, dice el director del centro. “Los servicios de Física Médica y Protección Radiológica del HUCA verifican periódicamente que estos aparatos funcionen dentro de los parámetros de seguridad establecidos. Tanto la seguridad de los pacientes como la de los profesionales está garantizada al estar sometidos a controles periódicos internos y externos” añade.

Diagnóstico avanzado por imagen

Además, el HUCA aprovechó su traslado para completar y renovar por completo los dispositivos del Servicio de Radio-



Miguel Javier Rodríguez, director del Hospital Universitario Central de Asturias.

diagnóstico, en el que se han instalado tres aparatos de resonancia magnética de nueva adquisición (que próximamente se ampliarán a cinco) y modernos aparatos digitales para realizar mamografías por tomosíntesis, menos dañinas para la paciente. “Esta dotación mejora mucho la calidad de los diagnósticos y es muy importante para el neurodiagnóstico o para enfermedades muy específicas”, de-

talla el doctor Faustino Arias, jefe del Servicio de Radiodiagnóstico, quien añade que en su especialidad también se realizan tratamientos concretos.

La utilización de estos aparatos (el *Magnetom Skyra*, y el *Magnetom Aera*, de 3 y 1,5 teslas —unidad que mide la intensidad del campo magnético— y una tercera diseñada para patologías musculoesqueléticas) obliga al paciente a permanecer



Una de las modernas salas destinadas a la obtención de imágenes para diagnóstico.

Instalaciones bajo control

Las instalaciones que poseen dispositivos radiactivos en medicina son sometidas a estrictos controles y evaluaciones desde antes incluso de su entrada en funcionamiento, para evitar una excesiva exposición a la radiación, ya que esta situación supone un riesgo para la salud del paciente y de los empleados del centro hospitalario.

Según dispone el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas, toda aquella instalación requerirá, según el caso, una autorización previa de construcción, de explotación, de tratamiento a pacientes, de modificación y de desmantelamiento, que es otorgada por el Ministerio de Industria y requiere el informe favorable del Consejo de Seguridad Nuclear. Estas concesiones están sujetas a estrictos controles y revisiones que realizan los propios técnicos del CSN y el servicio de protección radiológica del centro hospitalario.

“La autorización se concede en dos fases: con la primera, el permiso de funcionamiento que concede el Ministerio de Industria, que permite solamente hacer pruebas, es decir, no se pueden tratar pacientes, y tiene que ser previo informe preceptivo y vinculante del CSN sobre la viabilidad de la instalación”, dice Carmen Álvarez, jefe del Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas del CSN. Una vez que la instalación está preparada y se han adquirido tanto el material radiactivo como los equipos, el titular de la instalación solicita una inspección al CSN. Si todo está correcto, es el mismo Consejo quien emite una notificación de puesta en marcha para que pueda tratar pacientes.

España dispone actualmente de un total de 364 instalaciones médicas radiactivas y más de 34.000 de rayos X legalizadas, que se revisan cada año. “Se realiza un control por inspección anual a todas las instalaciones radiactivas y los titulares también están obligados a mandar un informe de funcionamiento de los últimos doce meses que se revisa por parte de los expertos del CSN”, destaca Álvarez.

En algunas concesiones, como ocurre con los aceleradores lineales, también se aumentan los controles. “En este caso, exigimos que se haga una dosimetría (medición de la radiación) en el área alrededor del búnker en el que se encuentra el acelerador, en los lugares que puedan estar ocupados por personas, y los resultados nos los mandan al CSN cada tres meses”, añade Álvarez.

Además, en el supuesto de que suceda cualquier tipo de incidente en la instalación, los protocolos de seguridad son muy exigentes. “Si se quedara una persona encerrada por equivocación dentro del búnker y se hubiera puesto en marcha el acelerador, los responsables deben comunicarlo al CSN en 24 horas y si el accidente es muy grave, la comunicación tiene que ser en una hora para reaccionar y actuar según los protocolos establecidos”, detalla la jefe del Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas del CSN. ▶



Algunos de los aparatos con que cuenta el HUCA en sus renovadas instalaciones. De arriba a abajo, Acelerador CL IX, Magnetón Skyra y Resonancia Aera.

durante un determinado periodo de tiempo inmóvil dentro de un estrecho tubo y ahora, gracias a los nuevos equipos, existe una mayor amplitud y se reduce el tiempo de adquisición de los datos.

“La resonancias de 3 teslas tiene una capacidad de resolución altísima, podríamos decir que se puede ver hasta el último detalle de cualquier estructura anatómica”, señala el director del HUCA. Concretamente, este aparato del centro fue el primero de estas características que se instaló en un centro sanitario público en España.

Gracias a estos dispositivos, los servicios del hospital pueden obtener imágenes de alta resolución, especialmente útiles para los diagnósticos por neuroimagen, con un gran potencial para diagnosticar enfermedades como el cáncer o patologías neurodegenerativas como las demencias.

Un paso más en Medicina Nuclear

“En el caso del HUCA, se trata de uno de los servicios de mayores dimensiones y con mejor dotación tecnológica de España, lo que nos permite ofrecer prácticamente todas las prestaciones de la especialidad. Además, en su mayor parte dispone de luz natural, lo que es un verdadero lujo”, describe el doctor Francisco Manuel González, jefe del Servicio de Medicina Nuclear del centro asturiano. La organización de esta especialidad implica la interrelación de tres unidades: la de radiofarmacia, la de diagnóstico metabólico y molecular y la de terapia radiometabólica.

La inversión del nuevo HUCA ha servido para mejorar espectacularmente la dotación del Servicio de Medicina Nuclear, de manera destacada en la Unidad de Radiofarmacia, pasando a situarse actualmente a la vanguardia a escala nacional.

En este servicio, las áreas se aseguran mediante blindajes para la protección



Luis Olay, jefe del Servicio de Oncología Terapéutica del HUCA.

radiológica de los trabajadores y se acondicionan para crear un ambiente óptimo en la elaboración de los radiofármacos. “El control de calidad es crítico. Así, antes de su dispensación, todos los radiofármacos son sometidos a un control

mediante radiocromatografía y solo son dispensados si tienen un alto nivel de pureza radiofarmacéutica”, puntualiza Francisco Manuel González. Además, esta unidad dispone de un *software* específicamente diseñado para registrar cada



Vista del interior de las nuevas instalaciones del Hospital Universitario Central de Asturias.

actividad, garantizando una trazabilidad absoluta tanto de los productos empleados como de los procesos y profesionales que participan en cada fase de su elaboración.

“Cumplimos todos los estándares de buena preparación de radiofármacos y la calidad de esta unidad ha sido certificada por AENOR, ya que adoptamos toda la normativa vigente para la preparación de radiofármacos para uso propio, así como las normas estructurales y tecnológicas para la fabricación y dispensación externa de monodosis de radiofármacos listos para su uso; aunque esto último se encuentra pendiente de la preceptiva autorización administrativa”, resume el jefe del Servicio de Medicina Nuclear.

En cuanto al equipamiento, la especialidad de diagnóstico metabólico y molecular ha sido ampliada con una tomogammacámara de doble cabezal (conocido por sus siglas en inglés como “SPECT”), dos equipos SPECT/TC, que son equipos híbridos de SPECT y tomografía computerizada (TC), y un PET/TC de última generación. Estos aparatos permiten el estudio pormenorizado de la fisiología de los sistemas corporales y permiten diferenciar la actividad metabólica de los tejidos sanos de la de los tejidos enfermos. “La combinación de estas modalidades mejora la resolución espacial y temporal de las imágenes y permite diagnósticos más precoces que con otras técnicas”, subraya González.

Por su parte, también se ha desarrollado la Unidad de Terapia Radiometabólica, convirtiéndose en una de las mejores instalaciones de España por su amplitud (5 habitaciones) y la capacidad de gestión de los residuos producidos. “Como su diseño es de última generación, dispone de sistemas de seguridad redundantes que impiden la emisión de residuos radiactivos líquidos al medio



Faustino Arias, jefe del Servicio de Radiodiagnóstico del HUCA.

ambiente”, detalla el jefe del Servicio de Medicina Nuclear.

En resumen, esta unidad está capacitada para administrar todas las modalidades de tratamiento con radiofármacos del catálogo de prestaciones de la Sociedad Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular, incluidas las nuevas terapias con isótopos emisores de radiación alfa o la radioembolización de tumores hepáticos, entre otros.

Terapias vanguardistas

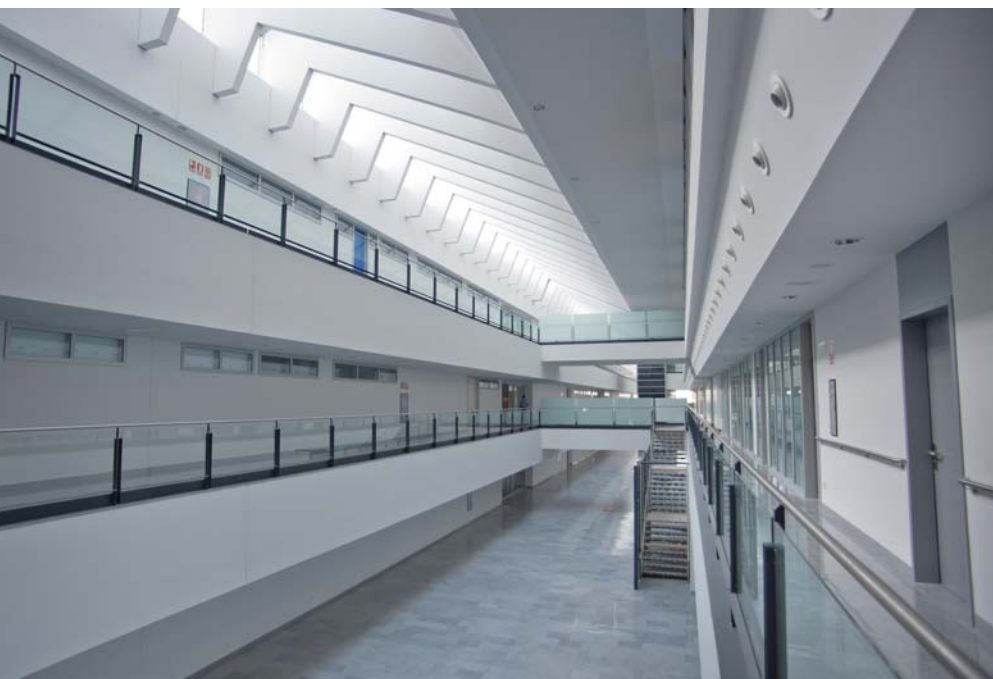
Gracias a la suma de estos dispositivos de alta tecnología y a la experiencia y formación del equipo médico, los servicios del Hospital Universitario Central de Asturias pueden ofrecer algunas de las técnicas más avanzadas. “Combinamos técnicas de todo tipo, muy variadas y con diversas aplicaciones, desde lesiones complejas hasta tratamientos sencillos o paliativos”, destaca Luis Olay, jefe del Servicio de Oncología Terapéutica.

Los nuevos aceleradores permiten realizar actuaciones tan avanzadas como la radioterapia guiada por imagen, los tratamientos con intensidad modulada

de radiación y volumetría o el hipofraccionamiento. Esta última técnica es capaz de ampliar el rango de patologías que pueden ser tratadas en una o pocas sesiones al aumentar la dosis por sesión sin incrementar la toxicidad.

“Para casos más graves, por ejemplo, lesiones que estén situadas en órganos de riesgo, necesitamos las tecnologías más avanzadas como la arcoterapia volumétrica modulada (VMAT), un modelo que permite alcanzar dosis incluso más altas y con mayor precisión sobre los tumores”, añade Olay. Esta novedosa técnica permite modular la intensidad del haz de radiación disparado durante el tratamiento, a medida que el acelerador lineal va girando en torno al paciente, lo que aumenta las posibilidades de curación y reduce los efectos secundarios.

“Es una terapia que llamamos ‘en arco’ y que, dependiendo de los tejidos que vaya encontrando, va a dar una intensidad diferente, ya que conseguimos que la dosis de radiación se deposite prácticamente sobre el tumor, que quede focalizada y que la recibida por los te-



Se ha procurado que la estructura interior del edificio sea funcional y cómoda.

jidos cercanos sea muy baja”, comenta el jefe de Oncología Terapéutica. Desde que se puso en marcha, hace pocos meses, se han tratado con esta técnica más de 100 pacientes, lo que a juicio del responsable del servicio es un hito. “Lo habitual en un año en otros hospitales es realizar 10 o 15 tratamientos, nosotros llevamos un centenar en seis meses”.

Un reconocido servicio

Otra de las técnicas más modernas utilizadas es la ablación por ecografía o radiofrecuencia, un tratamiento en el que a través de instrumental médico se emiten unas microondas para generar calor en la zona y destruyen el tumor en todo tipo de órganos. “Somos el hospital de referencia para toda Asturias y disponemos de la más alta tecnología para desarrollar la ablación o el código ictus, entre otros tratamientos”, asegura Faustino Arias. Con el protocolo de actuación Código Ictus del HUCA (procedimiento de alta prioridad para tratar este trastorno sanguíneo cerebral) se atiende a una media de 600 personas al año. “No somos el único hospital que realiza este

protocolo, pero estamos a la vanguardia”, subraya.

Además, en el centro asturiano, para tumores concretos como el cáncer de mama o de pulmón, también se encuentran realizando otro avanzado tratamiento: el GATING. “Con esta técnica, abordamos el tumor solo en una fase del ciclo respiratorio, de modo que el paciente debe mantener una inspiración y en ese momento concreto el acelerador dispara el haz de radiación”, describe Luis Olay. En este proceso, el equipo PET/TC envía las imágenes metabólicas directamente para su planificación y tratamiento en los avanzados aceleradores.

Con esta actuación, se evita irradiar innecesariamente tejidos de pulmón sano y se disminuye la cantidad de radiación que puede ser dañina para el paciente. “Somos más precisos, pero en este caso sobre todo evitamos más efectos secundarios”, explica Olay. El Servicio de Oncología Terapéutica ha utilizado la terapia de GATING con decenas de pacientes, gracias a un esfuerzo muy importante de todos los profesionales. “Es un trabajo en equipo: desde los médicos, los físicos,

los técnicos... es todo un engranaje complejo que está funcionando muy bien”.

Pero si hay alguna técnica en la que el HUCA destaca es la braquiterapia: un tratamiento que introduce en el paciente una fuente que está en contacto directo con el tumor y libera una radiación muy localizada. “Somos prácticamente un servicio pionero en el uso de la braquiterapia, con una trayectoria de más de 40 años”, describe el jefe de Oncología Terapéutica. En el último año, Oncología Terapéutica ha puesto en marcha una terapia avanzada de braquiterapia endobronquial que mejora sensiblemente el resultado de los tratamientos que se aplican a los pacientes con cáncer de pulmón y les permite conseguir una mayor calidad de vida.

Pero ha sido gracias a los últimos avances tecnológicos, cuando los profesionales del centro asturiano han podido ir un paso más allá y actualmente utilizan una técnica de braquiterapia con dosimetría en tiempo real, que permite al equipo de médicos observar qué cantidad de radiación está recibiendo el tejido al instante. En el caso concreto del cáncer de próstata, esta técnica introduce la carga radiactiva cerca del tumor y unos dosímetros miniaturizados en la uretra del paciente. Según Olay, “estos dispositivos nos permiten medir la dosis que está recibiendo en tiempo real e incluso modularla”. “Prácticamente somos el único hospital de España que realiza esa dosimetría en tiempo real y de los pocos de Europa, ya que estamos midiendo dentro de la misma próstata la radiación que está recibiendo. Nos aporta mucha seguridad en los tratamientos ya que sabemos qué estamos haciendo en tiempo real”.

La perfecta conjunción de inversión económica, dispositivos y técnicas de última generación y los profesionales del HUCA han permitido que se abra un futuro más esperanzador para los pacientes asturianos.

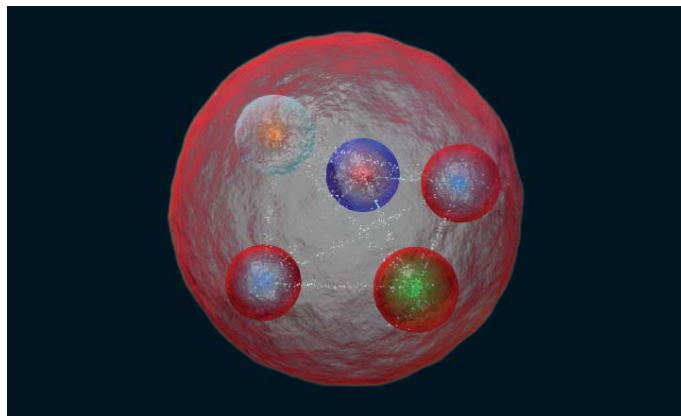


Reacción en cadena

NOTICIAS

Pentaquark, un nuevo tipo de materia

Científicos que trabajan en el experimento LHCb del acelerador LHC del CERN, en Ginebra, han descubierto una nueva y exótica clase de partículas formadas por cinco quarks. Los quarks son las partículas más elementales con las que se construye la mayor parte de la materia conocida. Por ejemplo, los protones y los neutrones que forman el núcleo atómico están formados por tres quarks. Recientes experi-



mentos consiguieron crear en laboratorio partículas de cuatro y de seis quarks. Estas nuevas, denominadas pentaquarks, completan el panorama.

Los investigadores, que han publicado el hallazgo en

Physical Review Letters, afirman que el pentaquark, que está formado por cuatro quarks y un antiquark, no es solo un nuevo tipo de partícula sino que también es “un modo de agrupar los quarks

de una forma nunca vista en más de 50 años de búsquedas experimentales”. La nueva forma de materia no tiene, al menos de momento, aplicaciones prácticas.

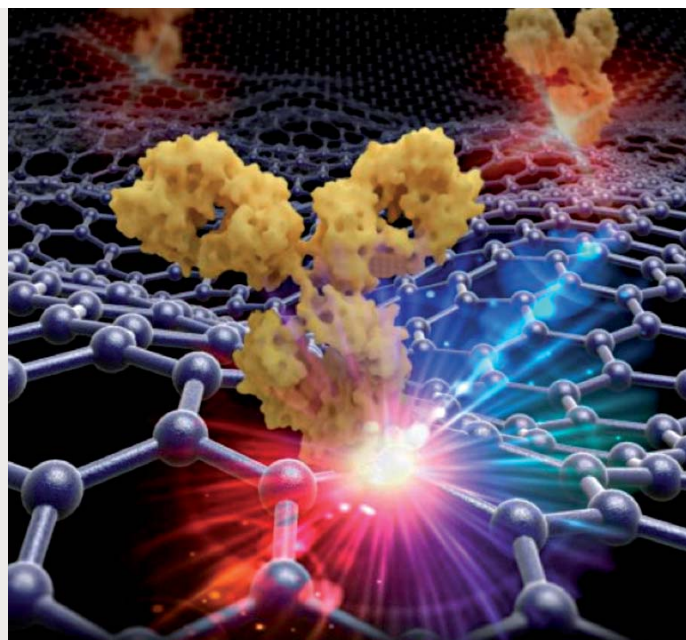
“El modelo de quarks, propuesto hace más de 50 años, no excluye la posibilidad de que existan partículas formadas por más de tres quarks, pero estos llamados *hadrones exóticos* solo empezaron a dar muestras de su existencia hace pocos años”, cuenta Juan Saborido, responsable del grupo de la Universidad de Santiago de Compostela participante en LHCb.

Un sensor de grafeno para detectar nanomoléculas

El grafeno es, al decir de los expertos, un material destinado a revolucionar la tecnología, ya que goza de una excepcional resistencia, ligereza y conductividad térmica y eléctrica, entre otras cualidades que le convierten en un material con multiplicidad de aplicaciones en diversos campos. Ahora, científicos de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) y del Instituto de Ciencias Fótónicas de Barcelona (ICFO) han descubierto que posee propiedades ópticas que le permiten ser usado como sensor de moléculas altamente sensible y reconfigurable, mejorando los sistemas actuales más eficientes para la detección molecular, como la espectroscopia de absorción infrarroja, que utiliza la luz

para excitar moléculas y determinar su identidad por las diferentes formas de vibrar de cada una. Gracias al grafeno se reduce el tamaño de las moléculas detectadas hasta el ámbito nanométrico.

Según Valerio Pruneri, del ICFO, “el concepto puede ser usado en diferentes aplicaciones, desde la detección de gases tóxicos, explosivos o contaminantes en el agua, hasta el ADN y las proteínas. Además, el nuevo proceso



permite llevar a cabo un análisis complejo utilizando un solo dispositivo, y lo hace sin estresar o modificar una muestra biológica.

Cerveza enriquecida con selenio

La cerveza, consumida en dosis moderadas, puede contribuir a llevar una alimentación equilibrada, ya que proporciona ciertos minerales y nutrientes escasos en la dieta. Por eso, investigadores de la Universidad de Extremadura (UEx) y de la Universidad de Nottingham han desarrollado una variante de esta bebida con selenio, un micronutriente escaso, que cumple funciones importantes en el metabolismo, el sistema inmune, el tiroides y el estado anímico. El trabajo se ha publicado en *Food Chemistry*.

El equipo diseñó un trigo enriquecido en este elemento y consiguió una cerveza con un 10 % más de selenio. “Hemos visto que es en la retirada del bagazo (la cáscara residual que se produce cuando se rompe el grano) cuando se pierden más minerales; casi la mitad en el caso del selenio”, explica Sara Rodrigo, ingeniera agrónoma de la UEx e investigadora principal del estudio, y añade que “tomar el selenio en pastillas, donde el mineral está presente de forma inorgánica, es mucho menos efectivo, ya que de forma orgánica se asimila mucho mejor por el organismo”.

Para conocer la cantidad media de selenio en las cervezas de todo el mundo, los investigadores analizaron un total de 128 cervezas de diferentes países y así crearon un perfil mineral de las variedades de cada zona. Aunque los resultados de esta segunda parte aún están en vías de publicación, los investigadores adelantan que las cervezas estadounidenses poseen diez veces más selenio que las europeas.



LIBROS

Medicina sin engaños

José Miguel Mulet

Editorial Destino. Colección Imago Mundi

Barcelona, 2015

“Yo no sé si hace algo o no, pero lo cierto es que me encuentro mejor”, es el argumento más repetido por los pacientes de algunas de las llamadas medicinas alternativas o complementarias. Las opciones al margen de la medicina alopática, es decir, aquella de la que disfrutamos cuando acudimos a una consulta médica normal, son cada vez más numerosas. Flores de Bach, aromaterapia, acupuntura, homeopatía... son solo algunas de estas prácticas, que ganan cada vez más adeptos a la vez que crecen las dudas sobre su fiabilidad. Como ya hiciera en sus obras *Comer sin miedo* y *Los productos naturales*, ¡vaya timo!, dedicadas respectivamente a desmitificar los

transgénicos y la idea de que natural es sinónimo de bueno, José Miguel Mulet, bioquímico del Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas (centro mixto CSIC-Universidad de Valencia), dirige sus dardos ahora contra las medicinas alternativas y pone en evidencia algunos de sus engaños; muestra cómo ciertas prácticas constituyen un

mero negocio a costa de la salud y el bolsillo de las personas que acuden a ellas.

Medicina sin engaños J.M. Mulet

Todo lo que necesitas
saber sobre los peligros
de la medicina
alternativa



EFEMÉRIDES ► HACE 200 AÑOS...

Se publica la hipótesis de Prout

Con la aparición de la teoría atómica en 1809, los químicos comenzaron a investigar los pesos atómicos de los elementos. Se sabía por aquel entonces que el átomo de hidrógeno parecía el de menor masa y que otros pesos atómicos parecían ser múltiplos del peso del hidrógeno.

El químico inglés William Prout (1785-1850) sugirió en 1815 —hace 200 años— que el hidrógeno era el átomo fun-

damental, y que los átomos de los demás elementos eran, en realidad, agrupaciones organizadas en múltiplos absolutos de varios átomos de hidrógeno.

Aunque su hipótesis no fue tomada en serio al principio —con el tiempo se determinaron pesos atómicos que no eran múltiplos exactos del peso del hidrógeno—, 100 años después se descubrió que la *hipótesis de Prout* era en gran medida cierta, si bien la verdad era más compleja y sutil de lo que pudo sospechar su autor.

AGENDA

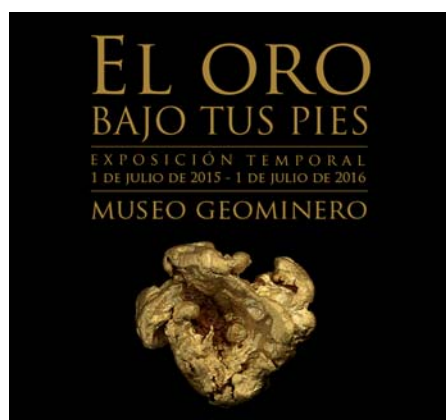
Exposición "El oro bajo tus pies"

Hasta el 1 de julio de 2016

Museo Geominero

Ríos Rosas, 23, Madrid

Después de milenios de explotación del oro, podría pensarse que apenas deben quedar muestras de este metal en el suelo de nuestro país. Esta exposición, sin embargo, pone de manifiesto que aún quedan reservas de este preciado metal bajo nuestros pies.



El Museo Geominero, perteneciente al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), ha recopilado un total de

120 pepitas de oro que son reflejo del reciente resurgimiento en la búsqueda del preciado metal. Algunas, además, son de extraordinario valor, como una pepita de 135 gramos extraída recientemente en Badajoz, o cristales de oro con formas geométricas que ejemplifican el orden que adoptan los átomos de oro para formar estructuras cúbicas.

La exposición incluye también un enorme canto rodado de cuarzo lechoso con partículas de oro visibles en su superficie, y una réplica de la pepita de oro más grande del siglo XIX, de 37 kilos de peso, hallada en los Urales. La original se fundió para cubrir gastos de guerra. La entrada es libre al público durante un año entero.

MUSEO

Museo Nacional de la Energía

Av. Libertad, 46

Ponferrada

El Museo de la Energía de Ponferrada es un espacio de referencia en el campo de la divulgación científica y el ocio cultural, donde se abordan temas relacionados con la energía desde distintos puntos de

vista y bajo ángulos diferentes, intentando ofrecer al visitante una experiencia cultural atractiva y estimulante.

La Fábrica de Luz es el edificio central del museo. Está ubicado en una antigua cen-



tral abandonada, que se mantuvo en funcionamiento entre 1920 y 1971, y muestra la relación del carbón con la energía desde los puntos de vista tecnológico y social. Su restauración se ha realizado respetando los elementos originales de la central y ha posibilitado la recuperación, para nuevos usos culturales, de una de las joyas del patrimonio minero español. Además de este espacio, el Museo cuenta con otros dedicados a la realización de actividades, que son de libre acceso. Toda la información sobre su ubicación, horarios y servicios se encuentra en la web <http://enemuseo.org>.

LIBROS

Amor y matemáticas

Edward Frenkel

Editorial Ariel. Barcelona, 2015

¿Qué sucedería si en clase de arte te enseñaran a pintar una verja? ¿O si jamás te mostraran una pintura ni te hablaran de la existencia de Van Gogh o Picasso? Pues así es como, según el autor de este libro, nos han enseñado las matemáticas. Se trata de uno de los matemáticos más brillantes del momento, Edward Frenkel, que se lanza a la difícil pero gratificante tarea de descubrir el lado de las matemáticas que "nunca nos han enseñado en la escuela", barnizadas con toda la belleza y elegancia de una pieza de arte.

Frenkel, profesor de la Universidad de Berkeley, nos sumerge en una disciplina presente en casi todas las demás y que une culturas a través del tiempo y el espacio. Y lo hace

a través de dos historias, la de la evolución del pensamiento matemático y los grandes protagonistas de la materia y, de forma paralela, la de su biografía personal, que le llevó de ser rechazado en la facultad de matemáticas de Moscú a convertirse en uno de los matemáticos más notables del siglo XXI.

La obra trata de introducir al lector en una nueva forma de pensamiento capaz de enriquecer su vida personal y ayudarlo a entender mejor el mundo y el lugar que cada uno ocupa en él. Es una invitación a descubrir la magia del universo escondido en la ciencia de los números.

Amor y matemáticas



Edward Frenkel

"Si no eres matemático, este libro te hará desear serlo."
NARIN NICHOLAS TALLER, autor de El cine negro

Ariel

EN RED



Una **app** crea postales personalizadas junto a los cuadros del Prado

El Museo del Prado y Samsung han lanzado una *app* que permite a los visitantes llevarse una postal digital personalizada —similar a una fotografía—, junto a la reconstrucción de cualquiera de las 50 obras más emblemáticas del Museo, como *El jardín de las delicias* de El Bosco, *La Anunciación* de Fra Angélico y *Las meninas* y *Las lanzas* de Velázquez. Los visitantes solo tienen que dirigirse a los tres puntos donde se han instalado los paneles con el código de realidad aumentada y, una vez allí, seleccionar, entre la galería de imágenes de la aplicación, el cuadro que quieren que aparezca en la postal.

A continuación, hay que captar con la cámara del móvil el recuadro del código, que es sustituido en la pantalla por la obra elegida, y después ajustar el número de personas y el tamaño del cuadro antes de disparar.

La postal digital queda almacenada en el dispositivo móvil y puede compartirse directamente a través de las

redes sociales o del correo electrónico.

PhotoPrado está disponible en trece idiomas y es accesible de forma instantánea, utilizando la conexión wifi del propio museo. Puede descargarse de forma gratuita en los dispositivos móviles, smartphones y tabletas con los sistemas operativos Android e iOS. ▶

Google Earth cumple 10 años... y lo celebra metiéndote dentro del Taj Mahal

Google Earth, el servicio que ofrece la mayor foto interactiva de la Tierra, celebra su décimo aniversario con dos nuevas formas de navegar por el planeta. La primera novedad es una capa para su aplicación Voyager. Se trata de una nueva forma de visualizar los mapas que permite pasear por ciudades integrando el Street View de Google Maps con las capacidades 3D de Google Earth. Gracias a ello, es posible pasear por lugares míticos como el Taj Mahal, el Gran Cañón, el Palacio de Westminster, el One World Trade



REDES



@CERN

Todos los avances y experimentos del CERN a golpe de foto. Para seguir el día a día del laboratorio de física de partículas más importante del mundo.



Y sin embargo... ¡la ciencia!

Este blog, con página en Facebook, explica la ciencia que sale en televisión. Una iniciativa para despertar nuestro sentido crítico y, sobre todo, conocer lo que no nos cuentan en la pequeña pantalla.



@ESA_Rosetta

Se trata del tuit *personal* de la sonda Rosetta de la Agencia Espacial Europea (ESA), donde publica en primera persona y en tiempo real todos los avances y descubrimientos sobre el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.



#ILolCiencia

Serie de vídeos realizados por el grupo de monologuistas científicos denominado *The Big Van Theory* para llevar la ciencia a la calle con mucho, mucho humor. ▶

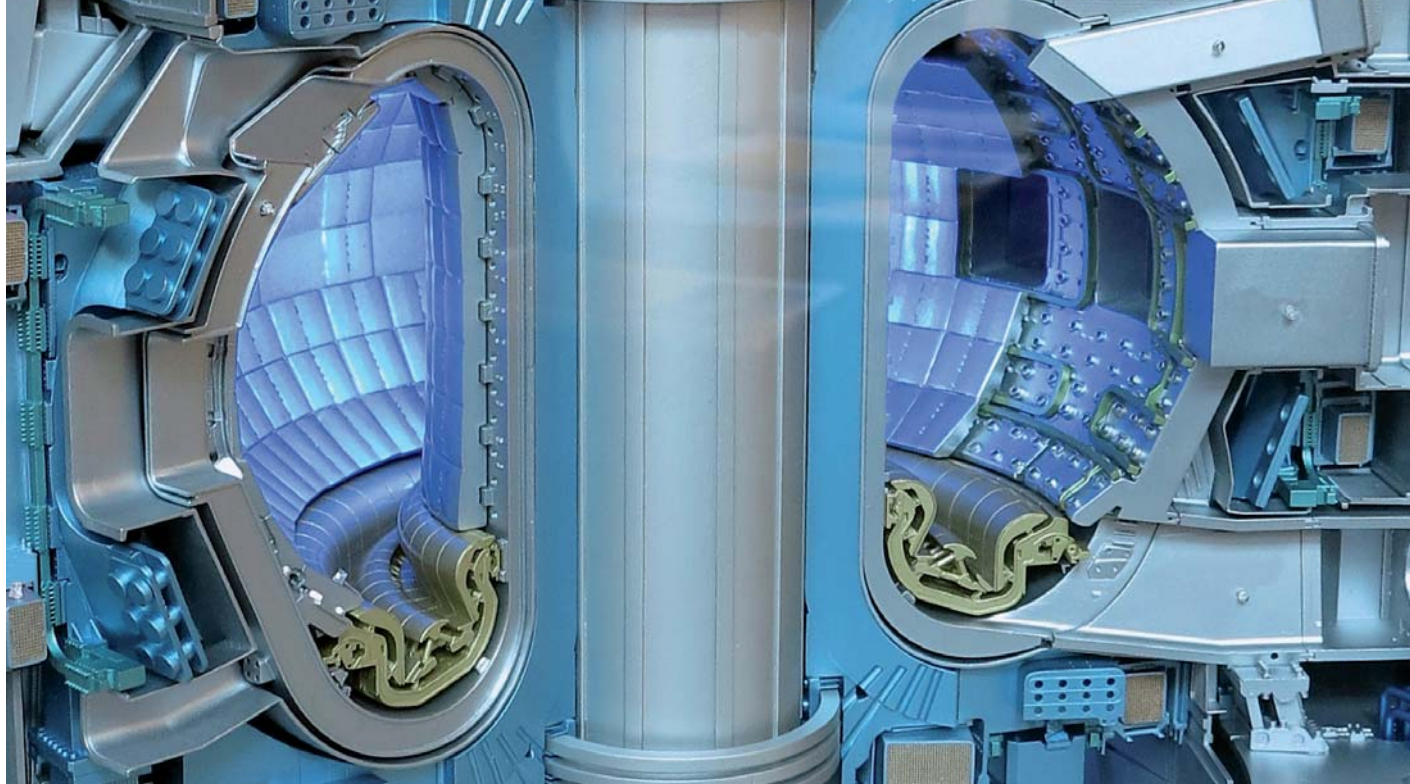
Center de Nueva York o la Torre de Tokio desde el ordenador, la tableta y el móvil.

Earth View, la segunda novedad, permite ver los paisajes más espectaculares del mundo desde el aire, pero con imágenes

en alta resolución de mayor calidad respecto a las que componen Google Earth y tratadas de una manera especial para que no aparezcan nubes ni existan grandes

diferencias de color y de contraste entre las miles de fotos que las conforman. Entre estos paisajes se encuentra el desierto de Australia, el emirato de Bahrein, las islas Marshall y las islas Aleutinas.

Google Earth cubre ya más del 45 % de la superficie terrestre y el 90 % de las zonas pobladas, con una resolución mínima de 2,5 metros. Ofrece también datos sobre transporte público en 18.000 ciudades de 70 países. En muchos casos, se puede ver también el estado del tráfico de sus calles. ▶



Sección de la cámara del reactor ITER, cuyas paredes recibirán un intenso bombardeo de neutrones y radiación muy energética.

Europa y Japón construyen una instalación para probar materiales para un futuro reactor de fusión nuclear

La fábrica de los supermateriales

El aprovechamiento de la fusión nuclear para crear una energía barata, segura y sostenible casi parece una promesa imposible. Pero, poco a poco, su día está llegando. El estudio y desarrollo de materiales capaces de sobrevivir a las extremas condiciones de irradiación dentro de un futuro reactor de fusión es un paso imprescindible, previo al uso de esta tecnología

con fines de producción de energía eléctrica. Ese es el objetivo del proyecto IFMIF, una novedosa instalación, fruto de un acuerdo entre Japón y Europa, que se está construyendo en Rokkasho, al norte del país asiático, para diseñar y probar los supermateriales de los que puede depender nuestro futuro energético. ■

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

Rokkasho. Esta remota aldea costera al noreste de Japón, en la prefectura de Aomori, haría las delicias de los lectores de las novelas de espías de John Le Carré. No tanto por la tranquilidad de la campiña, sino por la convivencia de varias instalaciones nucleares en un pueblo de apenas 11.000 habitantes: una planta de enriquecimiento de uranio; una instalación en fase de pruebas para producir combustible nuclear mediante el reprocesamiento del uranio y plutonio gastado; y buena par-

te de las reservas de plutonio del país —alrededor de 9 toneladas— lo suficiente, según los expertos, para cargar unas 1.000 cabezas nucleares.

Ahora, Rokkasho crece con la incorporación de una instalación internacional de irradiación de materiales denominada IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*). Se trata de un laboratorio gigante en el que someterá a los materiales a una fuente de neutrones de alta intensidad que reproducirá las condiciones que se encontrarán en la realidad

de un futuro reactor de fusión. Los que salgan victoriosos habrán sido, en jerga técnica, cualificados. El tiempo, en la lejana Rokkasho, va muy rápido.

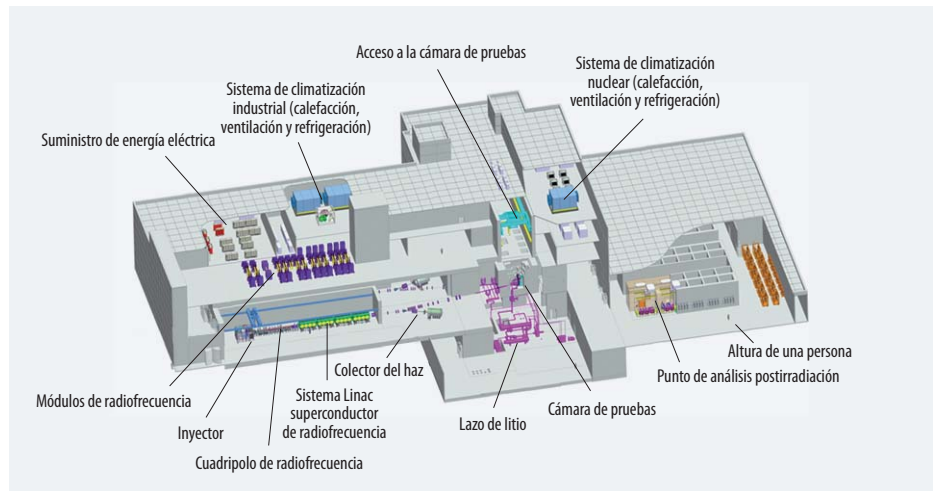
Energía infinita

Y es que el tiempo es un concepto de lo más ambiguo. A principios del siglo XX, Albert Einstein lo sacó de la comodidad que gozaba en la mecánica clásica —casi diríamos que retozaba en el trono de su absolutismo—, cuando propuso la teoría de la relatividad. Quizás por eso, el

tiempo que los científicos están tardando en conseguir que la fusión nuclear sea una opción viable, tecnológica y económicamente hablando, para producir energía, es más bien laxo y se expande y se expande como la masa de hojaldre que estira el pastelero antes de entrar al horno. Según la broma, los físicos llevan 40 años diciendo que en 40 años habrán conseguido la fusión.

Esta es la imagen que, sin profundizar demasiado, puede tenerse de la fusión, una promesa desde luego deseable, pero ciertamente aún inalcanzable. Ahora detengámonos un instante: por cada 100 toneladas del carbón que quemamos en una central térmica, la fusión nuclear tiene el potencial de producir la misma cantidad de energía usando un poco de agua y el litio que alimenta la batería de un portátil. Más aún, es intrínsecamente segura, prácticamente inagotable y no produce apenas residuos radiactivos ni emisiones de CO₂. Es, en última instancia, la representación en la Tierra de la física que ocurre en las estrellas, pero de una forma controlada y muchísimo más eficiente. ¿Qué se interpone entre este maná energético y la realidad?

Según los físicos nucleares, la falta de materiales capaces de operar en las condiciones de irradiación dentro de un reactor es uno de los mayores impedimentos y esa es la idea que lleva a la construcción de IFMIF. “El problema es que no tenemos toda la información de cómo se comportan los materiales cuando se irradian con esas cantidades de neutrones tan energéticos. Tenemos una idea de lo que puede ocurrir, pero este efecto no está totalmente demostrado”, explica Ángel Ibarra, jefe de división del Grupo de Tecnología de Fusión del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). Los supermateriales deberán cumplir con dos criterios de diseño: ser lo suficientemente resistentes para aguantar el daño neu-

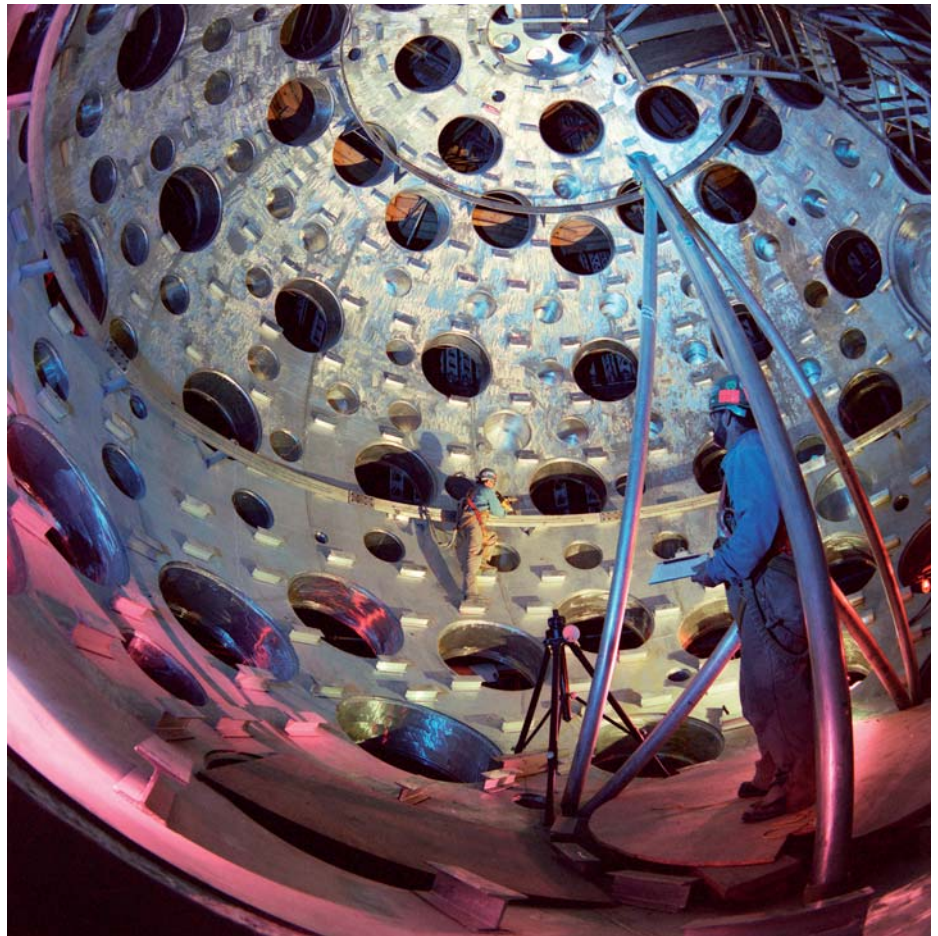


Maqueta del edificio que albergará el laboratorio eurojaponés IFMIF.

trónico y el efecto de las partículas cargadas por tiempos largos y lo suficientemente capaces de evacuar el calor del horno nuclear.

El proyecto IFMIF se desarrolla en el marco de un acuerdo bilateral entre la

Unión Europea y Japón firmado en 2007 para el desarrollo de la fusión, el llamado *The Broader Approach*. La financiación no proviene de la Comisión Europea, cuyo programa de fusión —*Fusion for Energy*— estaba casi agotado cuando se



Interior de la cámara del laboratorio estadounidense NIF, donde se ensaya la fusión nuclear por láser.

lanzó IFMIF, sino de contribuciones voluntarias de algunos países donantes, concretamente Francia, Italia, España, Bélgica, Alemania y Suiza. El presupuesto estimado para su construcción rondará los 1.000 millones de euros.

El Sol en una caja

Sin exagerar la metáfora, el ambiente dentro de un reactor de fusión es la auténtica definición de infierno: presiones de centenares de millones de atmósferas, temperaturas de más de 100.000.000 de grados y, sobre todo, un montón de neutrones de alta energía que al carecer de carga no se pueden dirigir con ningún campo magnético y rebotan alocadamente contra las paredes del reactor. La pesadilla de un ingeniero nuclear. Como dijo el físico francés Pierre-Gilles de Gennes, premio Nobel en 1991: “Decimos que pondremos el Sol en una caja. La idea es atractiva, el problema está en que no sabemos cómo ni de qué hacer la caja”.

La nueva instalación que se está construyendo en Japón se ha pensado para recrear las condiciones en que se

encontrarán los materiales que formen parte de esta futura caja. De forma un tanto esquemática, su funcionamiento será el siguiente: dos aceleradores lineales paralelos producirán iones de deuterio acelerado o deuterones que chocarán contra un blanco de litio líquido que se mueve a toda velocidad. La interacción del deuterio con el litio genera los neutrones de alta energía (14 MeV, o megaelectronvoltios) semejantes a los que produce la fusión nuclear, que irradiarán los materiales por estudiar.

Actualmente y hasta 2017, el proyecto se encuentra en la fase llamada EVEDA (*Engineering Validation and Engineering Design Activity*) que, entre otras cosas, consiste “en construir prototipos de las partes más complicadas de la instalación para demostrar que el diseño conceptual puede funcionar y, por otra parte, progresar en el diseño de ingeniería que habría que hacer para, cuando llegue el momento, tomar la decisión de construir la instalación completa”, explica Ibarra.



Reunión del consejo del ITER con representantes de todos los países participantes en el proyecto.

La lucha entre la luz y el magnetismo

En 1958, la tranquila ciudad de Ginebra acogió la segunda Conferencia Internacional para el Uso Pacífico de la Energía Atómica, lo que marcó el inicio de las investigaciones en fusión para uso civil, hasta entonces un programa militar clasificado. Casi 60 años después, varios proyectos internacionales se esfuerzan por superar los escollos tecnológicos y demostrar la viabilidad técnica y económica de la fusión nuclear con fines de producción de energía eléctrica.

El primero de ellos nos lleva a las suaves colinas y viñedos de Saint-Paul-lès-Durance, en la Provenza francesa, donde se está construyendo la máquina más cara y sofisticada que la ciencia ha imaginado: el ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), el primer reactor nuclear experimental de fusión que, aunque no permitirá encender ni una bombilla ni ser rentable económicamen-

te, sí demostrará su viabilidad tecnológica y arrojará la información necesaria para construir un futuro reactor demostrador ya comercial, de nombre DEMO, previsto para 2035.

Todo lo que rodea al ITER es gigantesco, desde su presupuesto —inicialmente de 5.000 millones de euros que luego se han superado con creces— a sus dimensiones —el reactor principal se construirá en una zona equivalente a 60 campos de fútbol—. Después de varios retrasos, los científicos planean que entre en funcionamiento en 2020. Recientemente, el francés Bernard Bigot fue nombrado sucesor del japonés Osamu Motojima al frente del proyecto. “El mundo entero necesita tecnologías innovadoras para asegurar un suministro de energía sostenible a largo plazo. La fusión por confinamiento magnético es una de las opciones más prometedoras. Estoy profundamente honrado por

Estas partes son el acelerador, de relativamente baja energía pero de muy alta intensidad, lo que supone un salto tecnológico importante, y la parte del blanco donde está el litio moviéndose, el llamado lazo de litio. “De momento el lazo de litio ya está construido y ha funcionado razonablemente; paró su actividad hace unas semanas. Al prototipo del acelerador aún le quedan todavía dos o tres años. La idea es que se monte en Japón, pero que las partes se construyan en distintos países europeos”, añade. Si todo sale bien,

se espera que el primer haz ilumine la instalación de Rokkasho para 2020.

Materiales candidatos

Volviendo a la caja de la que hablaba De Gennes, para construir un reactor de fusión harían falta tres tipos de materiales: por un lado, los de tipo estructural, aceros o equivalentes en la mayoría de los casos, para soportar el conjunto de la estructura; por otro lado, los llamados materiales de primera pared que son los que están más cerca del plasma —la mez-

cla de deuterio y tritio que alimenta al reactor— y que a su vez deben de ser capaces de extraer calor; y, finalmente, los funcionales, que son básicamente aislantes eléctricos de tipo cerámico y sistemas ópticos.

El efecto de la interacción de estos materiales con los neutrones puede ser devastador. Cuando se irradia un material con una partícula, cargada o no, esta interacciona con los átomos del material, de manera que se desplazan de su posición, como cuando chocan dos bolas de billar. Es lo que se llama “desplazamiento por átomo” o DPA, y es la causa de que se produzcan defectos en su estructura, lo que a su vez puede modificar sus propiedades mecánicas.

“Pero además —añade Ibarra—, “dependiendo de las características de la partícula que se está irradiando, pueden producirse reacciones nucleares que promueven la aparición de impurezas en el material, por ejemplo, átomos de hidrógeno o helio; es decir, cambios en su composición química”. En el caso de los reactores de fisión, casi todo el daño que se produce es por desplazamiento, pero en los de fusión, además de este, se producen reacciones nucleares que impurifican el material, sobre todo con helio e hidrógeno, cambiando así las propiedades del material.

Materiales estructurales

En el caso de los materiales estructurales, que suponen el 95 % del reactor, la degradación de las propiedades mecánicas por la irradiación de los veloces y energéticos neutrones representa el mayor problema. Este material, generalmente distintas versiones de aceros, va a estar conectado por una red de tubos que entra y sale y por los que circula el refrigerante que evacua el calor del reactor. “Hoy en día se contemplan como materiales estructurales aceros dentro de los cuales circula un refrigerante



Sección de la cámara de un tokamak, reactor de fusión por confinamiento magnético.

la posibilidad de contribuir a un programa de investigación tan grande, internacional y ambicioso como es el ITER, con la innovación como su principal objetivo. Tenga la seguridad de que voy a hacer todos los esfuerzos posibles para cumplir con las expectativas de los miembros del ITER”, dijo Bigot en su primera rueda de prensa.

El siguiente punto de vista aún no tiene espacio pero sí tiempo. Se trata del proyecto europeo HiPER, que afronta la cuestión desde otro ángulo: el llamado confinamiento inercial. Si el ITER emplea campos magnéticos (fusión por confinamiento magnético), el HiPER lo hace utilizando potentísimos láseres. En la actualidad se encuentra en la primera fase (*Physics Scheme Validation*) a la espera de que otras dos instalaciones más pequeñas ya existentes, el NIF (*Nacional Ignition Facility*) en Estados Unidos y el LMJ (*Laser Mega Joule*) en Francia obtengan resultados. Si estos son positivos, el calendario del proyecto plantea la construcción de una planta demostradora de potencia a partir del año 2028, aunque la localización aún no ha sido decidida. ▶



Visita a IFMIF de Santiago Herrero, asesor científico de la Embajada de España en Japón.



Algunos de los equipos que albergará IFMIF, a su llegada a la instalación.

líquido: metales líquidos del tipo del plomo-litio; flúor, litio, sodio, berilio; o algunos que optan por el litio directamente”, explica José Manuel Perlado, director del Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid.

El acero tenía dos alternativas tradicionales: aleaciones de vanadio (vanadio, cromo, titanio...) y materiales compuestos basados en carburo de silicio. “Algunos hablaban de materiales compuestos basados en carbono. La realidad es que hoy en día, y desde hace unos años, el dinero se ha invertido en aceros

de activación reducida, aceros de baja activación como por ejemplo, los aceros Eurofer 97, aleaciones con cromo y wolframio...”, según Perlado.

Una posibilidad en la que se está investigando mucho en la actualidad son los aceros llamados de activación reducida endurecidos por dispersión de óxidos (ODS), que son unos aceros normales en los que se embeben como impurezas partículas nanoestructuradas de óxido de itrio. Esas nuevas partículas actúan como una especie de anclajes que permiten aumentar mucho la tempera-

tura de funcionamiento del material. “No está claro cuál es la ventaja desde el punto de vista de la irradiación, pero sí que está claro que si tienen las mismas características de irradiación de los aceros más avanzados te va a permitir que si antes trabajabas a 400 °C ahora puedas hacerlo a 550 °C, lo que es una diferencia enorme”, aclara el investigador.

“La otra opción es que tengas envolturas sólidas hechas de cerámicas de litio: la estructura de la envoltura está hecha del propio material reproductor que es sólido, un cerámico sólido, dentro del cual están horadadas perforaciones por las cuales circula el refrigerante que es el helio. La propia estructura es el material reproductor porque lleva litio y ya está. En el primer caso, no tienes en principio ningún proceso de mantenimiento, sin embargo cuando tienes envolturas sólidas hechas de cerámicas de litio tienes que sacar cada cierto tiempo las cerámicas, llevarlas al laboratorio, reemplazarlas por otras porque tienes que sacar el tritio (el tritio se queda en la estructura cristalina del niobato de litio)”, añade Perlado.

Pero hay dos materiales que serían un sueño para los físicos si consiguieran utilizarlos como materiales estructurales: el carburo de silicio y el wolframio. El wolframio se está utilizando y se va a utilizar como material de primera pared, es decir, sin soportar cargas mecánicas. Para Ibarra, “si pudiéramos utilizarlo como material estructural podría trabajar a temperaturas muy altas, es decir, podríamos construir un reactor trabajando a 1.000 °C o incluso más. Y eso sería un sueño”.

El caso del carburo de silicio es similar: es capaz de trabajar a 1.200 °C, es muy ligero —pesa mucho menos que el acero—, y la activación que tiene por la irradiación de neutrones es muy baja... Otro sueño para los físicos nucleares. Pero en ambos casos y en este momen-

to, lo que se sabe de ellos no es suficiente para poder utilizarse como materiales estructurales.

Materiales de primera pared

Los materiales de primera pared deben ser materiales ligeros para no interactuar con el plasma. En el caso del ITER (el reactor de fusión magnética internacional que se está construyendo en Francia), se decidió usar placas de berilio y compuestos de carbono. Sin embargo, en los últimos años se ha descubierto que el hidrógeno reacciona de forma incontrolada con los materiales de carbono: se deposita carbono hidrogenado en distintas partes del reactor y aumenta la tasa de erosión. Cuando se introduzca tritio, se formarán pequeñas capas de carbono tritiado. Así, la tendencia en los últimos años es sustituir las placas de carbono por wolframio, un concepto que ya incorpora ITER y que DEMO (el futuro reactor de fusión precomercial) asumirá por completo.

“Lo que prima en los materiales de primera pared es el efecto de erosión. El material se calienta, pero puede resistir, no tiene por qué deteriorarse, pero lo



Ángel Ibarra, jefe de división del Grupo de Tecnología de Fusión del Ciemat.

grave es el efecto de las partículas cargadas —helio que se produce en la reacción de fusión, deuterio no consumido, tritio no consumido— que poco a poco van depositando su energía y, por reacciones nucleares, van sacando átomos

que la del berilio o de los compuestos de carbono. Lo uno parece que compensa lo otro”, según Ibarra.

Hasta ahora, la manera de utilizar el wolframio era mediante una especie de recubrimientos o *coating* sobre otro ma-



Entre los materiales que van a desarrollar se encuentran los de tipo óptico, esenciales en fusión inercial.

de la pared. Si esta tasa de erosión es muy grande, la pared, que en sí misma es muy fina, se va reduciendo de tamaño”, explica Perlado. Esta, en el caso de la fusión inercial, tiene un espesor de 1 milímetro y del orden de centímetros en el caso del punto de vista magnético. El efecto de los neutrones no es tan importante como en los materiales estructurales porque estos van a atravesar la fina capa, puede que haya un pequeño efecto porque habrá algunos que hagan retrodispersión y vuelvan hacia la zona de la pared, chocando con ella, pero es un efecto menor.

“El wolframio tampoco es perfecto porque precisamente no es un material ligero y si entra como impureza dentro del plasma funcionaría mal, pero tiene la enorme ventaja de que su tasa de erosión es varios órdenes de magnitud más baja

terial, generalmente acero, pero como sus coeficientes de dilatación son muy diferentes, al someterlos a diferencias de temperatura podrían romperse. “Hay varias técnicas para resolver eso; por ejemplo, insertando una capita de material intermedio, y para ITER esto se ha resuelto razonablemente. Pero el matiz es que para DEMO pensamos que necesitaremos piezas masivas, no vale con *coatings*. De todas maneras, en esto de los materiales también hay modas. Hace unos años te hubiera dicho que el material para una primera pared sería algún compuesto de carbono y ahora eso está totalmente prohibido”, matiza el investigador del Ciemat.

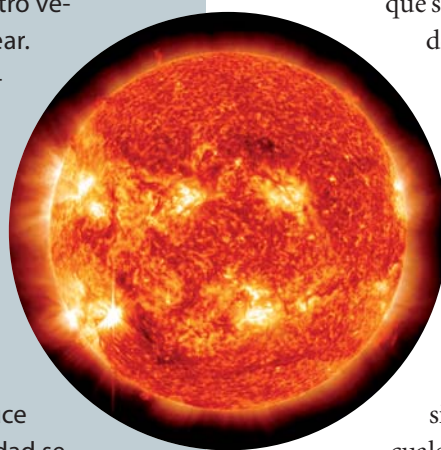
El grupo de Perlado en el Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, junto a investigadores del Departamento de Ciencia de

Fusión y fisión: la tabla de fuerzas

Los elementos más allá del hierro en la tabla periódica, como bismuto, plutonio y uranio, tienen la peculiaridad de que al ser bombardeados con neutrones de suficiente energía se rompen en dos trozos que producen neutrones y energía. Es lo que se conoce como fisión nuclear. Por cada kilogramo de material pesado se obtienen 24 millones de kilovatios por hora y el más fácil de fisiónar es el uranio 235.

Sin embargo, los elementos anteriores al hierro tienen la peculiaridad de que al chocar uno contra otro y vencer las fuerzas nucleares repulsivas entre los núcleos cargados positivamente dan lugar a un nuevo producto de menor masa que la suma de ambos, y liberan la diferencia de esta en forma de energía. Un montón de energía. Por ejemplo, la fusión de 1 kilogramo de hidrógeno produciría 96 millones de kilovatios por hora, cuatro veces más que la misma cantidad de uranio en la fisión nuclear. Si se compara con la combustión, la fusión del deuterio que existe en 1 litro de agua equivale a la energía producida quemando más de 350 litros de gasolina.

En un reactor de fusión, lo que se pretende es conseguir las presiones y temperaturas necesarias para que los núcleos de una mezcla de isótopos de hidrógeno, deuterio y tritio, en estado de plasma, choquen y se fusionen: el deuterio-tritio forma helio estable, neutrones y energía. A continuación, el helio sale disparado, choca contra un refrigerante y se calienta, produciendo vapor de agua que va a una turbina y produce electricidad. En las estrellas como el Sol, la fuerza de la gravedad se encarga de suministrar estas condiciones. Así, la energía solar es energía de fusión nuclear y el Sol, un reactor.



equilibrio y crean unos defectos llamados “centros de color” que vendrían a ser como los puntos negros que a veces nublan nuestras retinas. “Si el nivel de irradiación es bajo, puedes permitirte, pero si es muy alto habría que cambiar la óptica”, explica Perlado. En este caso, el material se vuelve opaco y disminuye la transferencia de energía o transmitancia del material, con lo que pierde su función.

En este sentido, el equipo de Perlado ha diseñado una solución de ingeniería con un sistema de rejillas. “Computacionalmente hemos comprobado que si calientas la óptica, los defectos producidos por los neutrones en el material se aniquilan entre sí y el material se satura: a partir de determinado nivel de daño, no aumenta el efecto. Nosotros hemos inventado un sistema de rejillas por las cuales pasa un determinado fluido de calentamiento; una especie de capilar, que calienta la lente por encima de su temperatura de operación. Computacionalmente, porque experimentalmente aún no está demostrado, ese sistema de rejillas homogeneiza el efecto térmico en la óptica, de tal manera que los defectos se aniquilan y la curva de absorción cambia, produciéndose solo un 2 % de pérdida de transmitancia”, concluye Perlado.

Horizonte 20/20

A pesar de todas estas investigaciones en nuevos materiales, algunos de los más prometedores, como el carburo de silicio y el wolframio usados como material estructural, aún son a largo plazo. Si los tiempos del IFMIF se cumplen, ¿qué tipo de materiales se probarán en la nueva instalación de Rokkasho?

Materiales, aplica la famosa nanotecnología para desarrollar materiales nanoestructurados, basados sobre todo en wolframio, como recubrimiento del reactor. “Se trata de obtener granos muy pequeños, de cualquier forma, pero de tamaño nanométrico, sobre todo de wolframio. Así, producimos un material con la misma estructura que tendrías en un wolframio convencional, pero en este caso con granitos pequeños, nanométricos, con lo cual el número de juntas es inmenso. La idea es que los defectos se vayan a las juntas, a las uniones entre los granos, y se queden allí, sin hacer daño a lo que es la estructura cristalográfica”,

Materiales funcionales

Aunque solo suponen aproximadamente el 5 % del reactor, los materiales funcionales son de vital importancia para el buen funcionamiento de este. Son fundamentalmente aislantes eléctricos y sistemas ópticos. En el caso de los primeros, su papel es de vital importancia, ya que en definitiva, un reactor de fusión es una máquina eléctrica, de tal forma que si los sistemas eléctricos fallaran, el reactor no podría funcionar.

En el caso de los sistemas ópticos, la sílice (SiO_2) es el material por excelencia. La irradiación puede producir sobre esta la movilización de los átomos de oxígeno que salen de sus posiciones de



Asistentes a una de las reuniones para el desarrollo del proyecto IFMIF que se construye en Japón.

“En mi opinión, cuando estemos cerca de poder meter algo en IFMIF tiene que haber un comité internacional que, junto con los diseñadores de DEMO, decidan qué materiales son los más críticos. Lo razonable es que el material que se pruebe es el que vaya a utilizarse como material estructural de DEMO y ahora mismo este es un acero (acero 95 eurofer o las versiones equivalentes chinas,

japonesas o estadounidenses, ya que cada país ha generado la suya, que son todas razonablemente parecidas). Esos son los que tienen más prioridad en este momento y los que opino que son más urgentes y que deberían irradiarse. Una vez que se hayan irradiado esos y se hayan cualificado, hay otras alternativas además del wolframio y el carburo de silicio, pero eso se decidirá en su momento”, responde Ibarra.

La Unión Europea ha fijado el año 2050 como fecha límite para una nueva era, podríamos llamarla de *decarbonización*, en la cual, la luz que alimente nuestros hogares al encender el interruptor provenga de las primeras centrales eléctricas de fusión. Eso ha acelerado los tiempos, el *roadmap* de la fusión: si DEMO, el reactor de demostración comercial tiene que funcionar cerca de 2050, debería comenzar a construirse en 2035, con lo cual su diseño conceptual debería tenerse para 2020, lo que supone que IFMIF tiene que dar resultados más pronto de lo pensado.

“IFMIF tiene dos objetivos estratégicos: cualificar los materiales que necesitamos para un reactor de fusión pero antes, en una primera fase, cualificar

los materiales que vamos a usar en DEMO. Obviamente, esperamos que sean los mismos, pero digamos que la urgencia de los datos que necesito es distinta: urgentemente para poder diseñar DEMO y después seguir trabajando para producir los datos que necesitaría un reactor de fusión”, concluye Ibarra. Esta demanda de datos ha supuesto que de momento sea suficiente con construir una versión reducida de IFMIF: un único acelerador en lugar de dos, de manera que una parte significativa de la planta puede reducirse y construirse más rápido.

Se prevé que para 2017 la construcción del acelerador haya finalizado. Si todo sale bien, los físicos generarán una base de datos de materiales irradiados con todas estas pruebas extremas que sirva para el diseño, la construcción, la obtención de la licencia y la operación segura de un futuro DEMO. Pero seguramente el conocimiento que se extraiga de IFMIF pueda aplicarse en otros campos: para el estudio de recubrimientos anticorrosión, en colectores, turbinas, en los futuros reactores de fisión de generación IV... El tiempo, una vez más, dirá qué se ha conseguido. ©



José Manuel Perlado, director del Instituto de Fusión Nuclear (UPM).



La torianita es un mineral hecho de óxido de torio, que forma cubos oscuros incrustados en esta amalgama.

La posibilidad de utilizar este elemento como combustible atómico seguro, limpio y barato no termina de cuajar

La promesa del torio

En la década de los sesenta, Estados Unidos construyó el primer reactor experimental que utilizaba torio en lugar de uranio para producir electricidad. A los ojos de muchos científicos, incluido el premio Nobel de química Glenn Seaborg, esto suponía el pistoletazo de salida hacia una nueva tecnología nuclear más segura, limpia y eficiente, que proveería de suficiente energía a la creciente población mundial. Al mismo tiempo, otra corriente de investigadores pedía prudencia ante una posibilidad que, más de medio siglo después, todavía sigue en fase experimental. Los grupos ecologistas son aún más escépticos y la sociedad apenas sabe del tema. Un mayor desarrollo permitiría saber si la promesa del torio es fundada, pero hasta entonces, el debate sigue candente. ■ Texto: **Elvira del Pozo** | periodista científica ■

A final de siglo, en el mundo habrá 12.000 millones de personas, 5.000 más que ahora, según las previsiones de Naciones Unidas publicadas en *Science*. Este incremento provocará que en los próximos 25 años se duplique el número de coches y que las necesidades energéticas aumenten un 37 %. El último informe anual de la

Agencia Internacional de la Energía (IEA, en sus siglas en inglés) también alerta del consecuente aumento en las emisiones de CO₂: “la temperatura media a largo plazo se incrementará 3,6 °C”, muy por encima de la línea roja de los 2 °C que los expertos marcaron para evitar consecuencias graves y generalizadas del cambio climático.

Una de las pocas opciones que la IEA considera viable para reducir la producción de gases de efecto invernadero es apostar por la energía de fisión. Y es que según señala el estudio, “las centrales atómicas han evitado la emisión de unas 56 gigatoneladas de monóxido de carbono desde 1971, lo que equivale a dos años de emisiones mundiales totales al ritmo actual”. Pese a esto, globalmente se tiende a dismantlar centrales: hacia el año 2040 habrán dejado de estar operativas casi 200 de las 434 que funcionaban a finales de 2013. Esta situación será más acusada en Europa, Estados Unidos, Rusia y Japón. Detrás de esta tendencia está la presión social, que las considera inseguras, fuente de residuos peligrosos (hasta la fecha, ningún país ha construido un almacén de larga duración para su confinamiento definitivo) y precursoras de armas atómicas.

¿Existe una alternativa atómica que no tenga estos temidos efectos? El torio, un elemento radiactivo, puede ser la solución del futuro de la energía nuclear. Así se asegura en el libro *Supercombustible. Torio, la fuente de energía verde para el futuro*. En opinión de su autor, el periodista especializado en energía atómica Richard Martin, “utilizado de manera adecuada, es mucho más seguro y limpio que el uranio”. Y además, el riesgo de que pueda ser utilizado para fabricar armas de destrucción masiva es mucho menor, dice. Por todo esto, el torio es una de las vías de investigación abiertas para el desarrollo de los futuros reactores nucleares, los llamados de IV generación. Aunque para poder tenerlos en plantas comerciales habría que esperar todavía unas décadas.

El torio tiene propiedades muy interesantes que lo hacen potencialmente atractivo como combustible atómico, explica el responsable de la División de Fisión Nuclear del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), Enrique González. “Se trata de un material más abundan-

te que el uranio y que podría ser usado en sistemas subcríticos donde no generaría una reacción en cadena autosostenida en caso de accidente”, comenta.

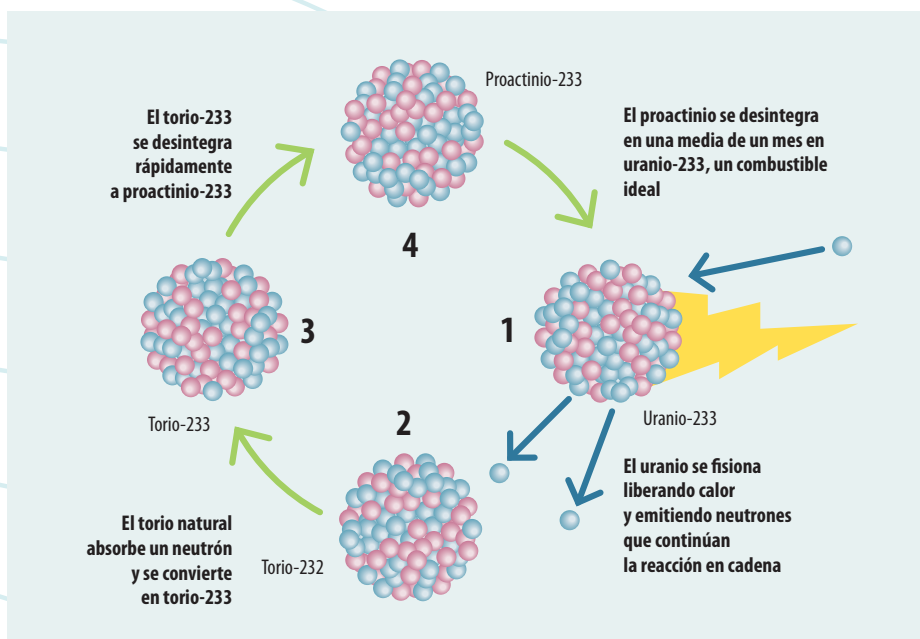
El torio tiene un único isótopo disponible en la naturaleza, el torio-232. Posee un núcleo estable que no es capaz de fisionarse si no se le somete a una fuente externa adicional de neutrones. En un sistema subcrítico (ADS, en sus siglas en inglés) se bombardea con neutrones para transformarlo en uranio-233, este ya sí fisionable en un reactor nuclear normal. Por esta característica, se dice que el torio es fértil. En estos sistemas, la cadena de fisiones se pararía por sí misma si cesara el aporte de neutrones.

“Para arrancar el ciclo del torio, será probablemente necesario utilizar previamente un sistema nuclear con combustible de uranio o plutonio”, explica González. La fisión de los núcleos de estos elementos produce los neutrones necesarios para “fertilizar” el torio y producir el uranio-233 necesario para dar criticidad a los reactores del ciclo del torio. La necesidad de contar con este combustible semilla o de inicio, limita las posibilidades de que el torio pueda sustituir completamente al uranio o al plutonio.

Una sonrisa radiante

“La radiactividad incrementa las defensas de los dientes y las encías”. Así se anunciaba la pasta dentífrica Doramad, fabricada en Alemania tras las Segunda Guerra Mundial con los excedentes de torio que resultaban de la fabricación de bombillas. Pese a lo llamativo de su eslogan, Martin escribe que este elemento es “menos peligroso que una pastilla de jabón”.

Esto responde al hecho de que el torio, pese a ser radiactivo, es muy estable porque su periodo de semidesintegración —tiempo en el que se desintegra la mitad de los núcleos de una muestra— es muy largo. Tarda unos 14.000 millones de años, mucho más de lo que lleva

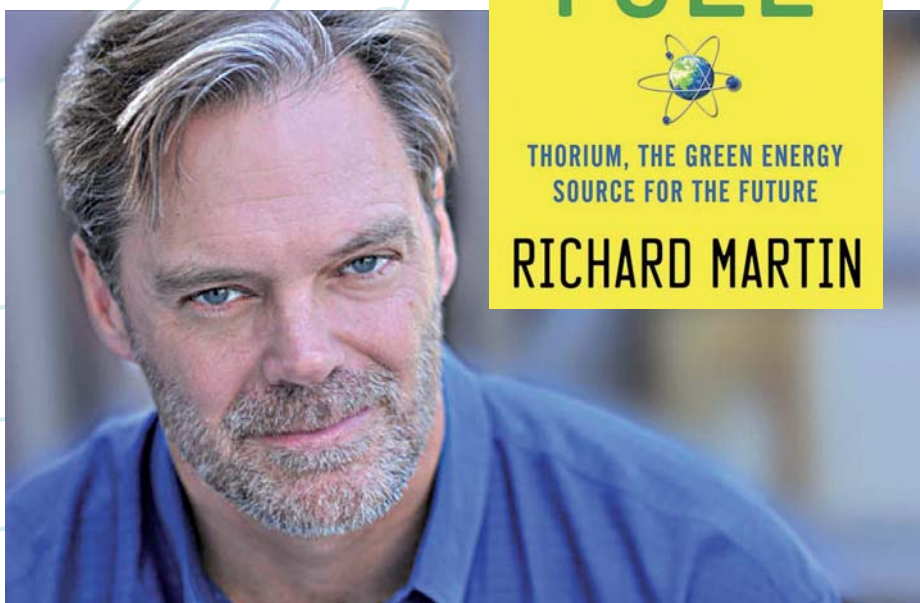


Ciclo del torio: el torio fértil se convierte en uranio-233, que se fisiona para liberar energía.

la Tierra de existencia (4.500 millones de años). Aunque no hay que olvidar que con los años emite cantidades significativas de rayos gamma, alfa y beta que pueden hacerlo peligroso si la cantidad de torio es considerable.

Otro de los grandes alicientes que defiende Martin en su libro es que los residuos que produciría una planta nuclear de torio serían teóricamente radiactivos durante un periodo más corto

que los generados en una central de uranio. La *Thorium Energy Alliance* estima que el material radiactivo dejaría de ser



El periodista especializado Richard Martin y la portada de su libro sobre el torio.

peligroso en 200 años, mientras que una central clásica de uranio requeriría, al menos, 10.000 años. Aunque González matiza: “los combustibles usados a partir del torio contienen isótopos radiactivos de vida larga, diferentes y en cantidades distintas a los del ciclo del uranio, no es simple cuantificarlo”.

Animados por las voces partidarias del torio, algunos países han iniciado la

carrera hacia una energía nuclear que promete ser más segura, generar menos residuos peligrosos y ser más económica. India, con el 12 % de las reservas mundiales de torio, ha puesto en marcha un prototipo de reactor de torio con la esperanza de que, en unas décadas, el 40 % de sus necesidades energéticas estén cubiertas por esta tecnología. China se ha propuesto tener una planta operativa en diez años.

Pese a todo, la opinión de la comunidad científica respecto al uso del torio es, sin embargo, prudente. Como expresa González, este elemento “presenta dificultades técnicas que complican su aplicación comercial y que requiere todavía décadas para poder

desarrollar una tecnología comercial capaz de solventarlas”. Además, compite con la industria nuclear basada en el reciclaje total del uranio y del plutonio en un ciclo cerrado. Esta promete las mismas ventajas pero, como lleva muchos años desarrollándose, cuenta con una base de conocimiento consolidada que podría convertirla en una opción muy competitiva en un futuro próximo.

No todo el campo es uranio

Los reactores rápidos de última generación producen combustible a partir del que gastan. Una gran ventaja si se tiene en cuenta que las reservas de uranio conocidas solo alcanzan para cubrir las necesidades de los próximos 150 años, según el último informe de *Uranio 2014* realizado conjuntamente por la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (NEA, en sus siglas en inglés) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Una consecuencia de la reutilización del combustible usado es que permite reducir a entre una centésima y una milé-



El torio está que truenas

En 1928, un sacerdote de la península noruega de Løvøya se topó con un mineral negro que no supo identificar. Una muestra llegó a manos del químico sueco Jöns Berzelius quién descubrió en él un nuevo elemento. Le llamó torio en honor al dios escandinavo de la tormenta, que, según la mitología, producía los truenos al surcar el cielo con su carro. El que luego fue considerado uno de los padres de la química moderna sumaba así un nuevo hito a sus hallazgos del se-

lenio y el cerio. Aunque no fue él quien detectó sus propiedades radiactivas, sino Gerhard Schmidt y Marie Curie, setenta años después.

El mineral del párroco noruego resultó ser ortosilicato de torio y fue bautizado con el nombre de torita. Posteriormente se localizó torio en otras sustancias naturales poco comunes, como son las monacitas y las torianitas. Todas ellas son oscuras, pese a que el torio es blanco plateado en estado puro, lo que se explica porque al exponer el elemento al aire, se ennegrece.

Uno de los usos del torio es la fabricación de las mallas de las linternas de gas portátiles. Esto es debido a que el óxido de torio tiene uno de los puntos de fusión más altos de todos los óxidos (3.300 °C) y emite una luz blanca brillante cuando se calienta. Gracias a esta propiedad, también se utiliza en los filamentos de las bombillas y en dispositivos eléctricos. Además, se emplea en la fabricación de electrodos especiales para soldar y de lentes de alta calidad de cámaras e instrumental de precisión. ▶



Enrique González, responsable de la División de Fisión Nuclear del Ciemat.

simas parte los residuos radiactivos de vida larga, defienden desde la Organización Internacional de la Energía de Torio. Aunque esto no es exclusivo del torio, puesto que ya existen plantas comerciales y experimentales que realizan este proceso a partir de uranio y plutonio, matiza González. También la obligatoriedad de requerir uranio o plutonio para arrancar el ciclo del torio limita la posible modificación de sus residuos radiactivos.

“Hay mucho más torio en la naturaleza que uranio”, escribe Martín. Se estima que hay entre tres y cuatro veces más reservas de uno respecto al otro, que aportarían suficiente energía como para cubrir las necesidades de toda la humanidad durante milenios, cuantifica.

Los defensores del torio como combustible nuclear mantienen que la energía producida por tonelada de torio extraída es 40 veces mayor que la del uranio. El uranio natural solo contiene un 0,7 % de uranio-235, el isótopo útil para los reactores de fisión, mientras que el 100 % del torio es el isótopo fértil torio-232. Sostienen que el uranio tiene que ser

procesado para enriquecerlo.

Aunque la supuesta mejora de eficiencia frente al uranio no tiene en cuenta que el 99,2 % del uranio natural, el uranio-238, es también fértil. Con el mismo proceso que seguiría el torio, es decir irradiándolo, se convertiría en un elemento fisil, el plutonio-239, apto para ser utilizado en los reactores nucleares. También la eficacia asociada al torio tiene en contra que el procesamiento químico y la gestión de la radiactividad de su extracción tienen un coste elevado.

¿Menos bombas atómicas?

Pónganse en un reactor nuclear 1.600 kilos de torio y bombardeense con neutrones. Siguiendo la *receta* elaborada por el investigador de la Universidad de Cambridge (Reino Unido), Steve Ashley, y publicada en la revista *Nature* (*Nuclear energy: Thorium fuel has risks*), en menos de un año se obtendrían los ocho kilos de uranio-233 que se necesitan para fabricar una bomba atómica.

En la misma línea se expresa el OIEA, que considera similar el riesgo de proliferación del uranio y del torio. Aunque

señala que el procesamiento de los subproductos del torio pondría en peligro la salud del operario. Esto es debido a que junto al uranio que se quiere extraer para producir bombas, los residuos también contienen elementos como el uranio-232 y sus hijos, que por su radiactividad son altamente dañinos. Evidentemente, esto no sería un problema para un terrorista suicida.

Una posición totalmente opuesta es la adoptada por los defensores del torio, que consideran la dificultad para construir armas de destrucción masiva como una de sus ventajas frente a los combustibles nucleares tradicionales. Su argumento se basa en que actualmente es muy complejo extraer el uranio-233 de la mezcla del reactor, según expresa Martín en su libro.

Desde la ONG ecologista Greenpeace, su experto en energía nuclear, Jan Beranek, subraya que la tecnología del torio está basada en la fisión y que, por tanto, no tiene resueltos los problemas asociados a ella como la proliferación de armas nucleares. Frente a lo que él denomina “el sueño de un futuro nuclear brillante” recuerda que las últimas tecnologías de energía renovables son ya más baratas y operativas.

Por ello, desde Greenpeace España, su responsable de la campaña nuclear, Raquel Montón, insta a no seguir “perdiendo tiempo, ni dinero, ni capital intelectual en tratar de hacer lo imposible: una fuente de energía nuclear que de verdad funcione”. En su opinión, “el futuro es renovable y ahí es donde hay que tender lo más rápido posible”.

La tecnología basada en el torio, que genera opiniones tan opuestas, está en fase de desarrollo y se ha probado solamente a pequeña escala. Hasta que no se desarrollen prototipos licenciados y operativos no se podrán valorar las ventajas reales frente a los sistemas actuales de uranio y plutonio, concluye González. ©

Panorama



Renovado el acuerdo bilateral con la NRC

El pasado 21 de octubre, el presidente del Consejo de Seguridad Nuclear, Fernando Marti Scharfhausen, y su homólogo, el presidente de la Nuclear Regulatory Commission (NRC), Stephen G. Burns,

firmaron en Washington la renovación del acuerdo bilateral que mantienen desde 1979 ambos organismos.

El acuerdo se renueva cada cinco años y su objetivo es el intercambio per-

manente de información técnica, como experiencia operativa, procedimientos reguladores, gestión de residuos y evaluación de impacto ambiental; la cooperación y colaboración en programas de investigación, de sucesos importantes, incidentes de operación, paradas de reactores y otras cuestiones técnicas; y estancias temporales de personal entre los dos organismos reguladores, con la presencia de expertos del CSN en inspecciones de la NRC, visitas a reactores en construcción y participación en cursos de formación, entre otras. Además, expertos del CSN se trasladan, durante determinados periodos de tiempo, a la sede del regulador estadounidense para adquirir experiencia desde otros puntos de vista, trabajando en las tareas del personal de la NRC.

Este encuentro ha puesto de manifiesto las buenas relaciones que ambos organismos mantienen desde hace años, el interés mutuo en seguir reforzando la cooperación internacional, el intercambio de lecciones aprendidas y las buenas prácticas en materia de seguridad nuclear. ▸

El OIEA presenta en el CSN su informe sobre Fukushima

El coordinador del Grupo de Acción de Seguridad Nuclear del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Gustavo Caruso, presentó el 22 de septiembre en la sede del CSN el informe elaborado por el OIEA sobre las causas, consecuencias y lecciones aprendidas del accidente ocurrido en la central nuclear japonesa de Fukushima. La jornada fue inaugurada por el presidente del CSN, Fernando Marti Scharfhausen, quien

destacó la importancia del informe para el CSN.

El informe es fruto de la colaboración de 180 expertos de 42 países y varios organis-

mos internacionales. Consta de seis volúmenes y analiza los factores humanos, organizativos y técnicos implicados, para que Gobiernos, regula-

dores y titulares de centrales de todo el mundo puedan aplicar las enseñanzas extraídas.

Caruso repasó los principales contenidos del trabajo, destacando la descripción y evaluación del accidente, la respuesta ante la emergencia, las consecuencias radiológicas para las personas y el medio ambiente, y la actual fase de recuperación. Como conclusión resaltó la revisión y refuerzo de los estándares de seguridad de las centrales de todo el mundo y la importancia de la cooperación internacional. ▸



Javier Dies Llovera, nuevo consejero del CSN

El Consejo de Ministros aprobó, el viernes 17 de octubre, el nombramiento de Javier Dies Llovera, catedrático de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) como nuevo consejero del Consejo de Seguridad Nuclear. Nacido en Lleida, Dies es doctor ingeniero industrial y primer premio final de carrera de su promoción y premio extraordinario de doctorado de la UPC, universidad donde ha coordinado el grupo de investigación de ingeniería nuclear.

Desde 2013, el nuevo consejero es vicepresidente de la European Nuclear Education Network (ENEN). Ha participado y ha sido evaluador en diferentes proyectos

de I+D nacionales y europeos y sus investigaciones actuales se centran en la seguridad nuclear basada en Análisis Probabilísticos de Seguridad. Autor de más de 240 publi-



caciones, ha dirigido 11 tesis doctorales y escrito el módulo educativo “Multimedia de la física de reactores nucleares”, distribuido a más de 83 países, y traducido a seis idiomas.

Entre 2004 y 2005 fue secretario de la Cátedra Argos de Seguridad Nuclear, auspiciada por el Consejo de Seguridad Nuclear, y subdirector de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona de 1995 a 2002. Ha participado en 12 misiones del OIEA en países como Argentina, Austria, China, Estados Unidos o Vietnam, entre otros.



Reunión con la Comisión Directiva de AMAC

El 1 de octubre visitó la sede del Consejo de Seguridad Nuclear la Comisión Directiva de la Asociación de Municipios en Áreas de Centrales Nucleares (AMAC). El presidente del CSN, Fernando Marti Scharfhausen, dio la bienvenida a los visitantes y explicó las actuaciones de carácter internacional, institucional y de comunicación que, desde la última reunión, ha desarrollado el organismo regulador. A la reunión, asistieron el director técnico de Seguridad Nuclear, Antonio Munuera, y la directora técnica de Protección Radiológica, María Fernanda Sánchez, que informaron sobre las recientes actividades realizadas por el CSN en materia de seguridad y vigilancia radiológica en el entorno de las instalaciones. Tras un amplio y abierto diálogo entre las partes, la sesión concluyó con una visita de los asistentes a la Sala de Emergencias.

El Foro Iberoamericano firma la Declaración de Lima

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear, encabezada por el consejero Fernando Castelló, participó en la vigésima reunión del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO), que se celebró en Lima (Perú) del 10 al 12 de junio. Los miembros firmaron la Declaración de Lima, para impulsar la actividad del FORO y afrontar los retos de futuro, mediante un plan estratégico, la consolidación de la presencia internacional y la definición de las líneas de actividad prioritarias que serán revisadas al final de cada etapa.

Durante la reunión, inaugurada por la actual presidenta del FORO, Susana Petrick, se revisó el Estatuto en vigor para actualizar la estructura. Los representantes de cada país presentaron un resumen de sus principales actividades del último año. Fernando Castelló habló de la situación del Almacén Temporal Centralizado (ATC) y de la central nuclear de Santa María de Garoña, así como la nueva Directiva Europea de Protección Radiológica y la importancia de los recursos humanos y la gestión del conocimiento para el CSN, entre otros asuntos. La presidencia del FORO pasó a Uruguay, donde se celebrará la próxima reunión.



Premio “Tierra, Agua y Fuego”, de la Unidad Militar de Emergencias, para el CSN

La consejera y vicepresidenta del CSN, Rosario Velasco, recibió el 7 de octubre el premio Tierra, Agua y Fuego, en su primera edición, de manos del teniente general jefe de la Unidad Militar de Emergencias (UME), Miguel Alcañiz Comas. El acto tuvo lugar el día de la patrona de la UME, la Virgen del Rosario, y dentro de las celebraciones del décimo aniversario de la fundación de la Unidad, en su Cuartel General de Torrejón de Ardoz (Madrid). La concesión reconoce la colaboración del Consejo en la formación del personal militar para cumplir con su misión de respuesta ante cualquier tipo de emergencias, con la cesión de equipos y el asesoramiento en cuestiones nucleares y radiológicas, así como el apoyo en otros proyectos, como el de las futuras escuelas prácticas de riesgos radiológicos.

Ambas instituciones reforzaron en 2009 sus ámbitos de colaboración mediante la firma de un acuerdo de colaboración sobre planificación, preparación y respuesta ante situaciones de emergencia nuclear y radiológica; intercambio de información; formación de actantes y comunicaciones entre la Salem del CSN y el Centro de Operaciones conjunto de la UME; asesoramiento en instrumentación radiométrica y preparación y diseño de ejercicios y simulacros.

En palabras de Rosario Velasco, “para el CSN siempre será un honor y motivo de confianza poder contar con la colaboración de la Unidad Militar de Emergencias, con la lealtad, la entrega y la capacidad de sus unidades, en particular, el Grupo de Intervención en Emergencias Tecnológicas y Medioambientales para aunar esfuerzos en la común misión de servir a la sociedad”.

59ª Conferencia General del OIEA

Más de 3.000 representantes de los 159 Estados miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), organizaciones y medios de comunicación participaron en la 59ª Conferencia General de dicho organismo, celebrada en Viena del 14 al 18 de septiembre. Gonzalo de Salazar, embajador permanente de España ante los Organismos Internacionales con sede en Viena, fue el encargado de presentar la declaración de España, redactada conjuntamente por el Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo y el Consejo de Seguridad Nuclear. En ella se abordaron, entre otros, asuntos como la colaboración del CSN en la planificación, redacción y revisión de las normas de seguridad del parque nuclear y la participación del regulador español en las misiones internacionales IRRS y en la planificación y desarrollo de los programas de cooperación técnica con Latinoamérica y el norte de África.



En el transcurso de la reunión, la vicepresidenta Rosario Velasco y los consejeros Antoni Gurguí y Fernando Castelló mantuvieron un encuentro con el director general del OIEA, Yukiya Amano. Además, Rosario Velasco y Antoni Gurguí participaron en la sesión conjunta de la Asociación Europea de Autoridades de Control Radiológico (HERCA) y de la Asociación de Autoridades Reguladoras de Seguridad Nuclear de Europa Occidental (WENRA) dedicada a las actuaciones transfronterizas durante la fase inicial de un accidente nuclear. Por su parte, Fernando Castelló asistió al encuentro organizado por el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, dedicado al intercambio de experiencias reguladoras entre el FORO y otras asociaciones de índole regional.

IV conferencia sobre fatiga de componentes de reactores nucleares

La vicepresidenta del CSN, Rosario Velasco, inauguró la cuarta *International Conference on Fatigue of Nuclear Reactor Components*, junto al secretario del Comité de Seguridad de las Instalaciones Nucleares (CSNI) de la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (NEA), Javier Reig; y Carlos Castela, de la Unidad de I+D y Gestión del Conocimiento del CSN, coordinador de la conferencia, que se celebró en Sevilla entre el 28 de septiembre y el 1 de octubre, organizada por la NEA, con el apoyo de la Comisión Europea y del Instituto de Investigaciones de la Energía Eléctrica.

En su intervención, la vicepresidenta del organismo regulador destacó la relevancia del estudio de la fatiga en los compo-

nentes de centrales nucleares, en especial del estudio del impacto de las condiciones ambientales, así como la necesidad de compartir información y abordar proyectos de investigación conjuntos en este campo, reconociendo la labor realizada por el CSNI en las anteriores conferencias.

El evento reunió a expertos de todo el mundo, incluyendo países como China, India y Rusia, que no habían participado en anteriores ediciones, y se dieron a conocer unos 70 trabajos, algunos de ellos presentados por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), las centrales nucleares de Almaraz y Trillo, la Fundación Centro Tecnológico de Componentes de Iberdrola, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Inesco Ingenieros, Innometrics y Tecnatom.



Protocolo de cooperación con la Agencia de Medio Ambiente portuguesa

El Consejo de Seguridad Nuclear y tres instituciones portuguesas con responsabilidad directa en emergencias radiológicas y nucleares firmaron un acuerdo de colaboración el pasado 30 de julio. Firmaron el documento el presidente del CSN, Fernando Marti Scharfhausen, por parte española, y el presidente de la Agencia de Medio Ambiente (APA) portuguesa, Nuno Lacasta, junto con la Autoridad Nacional de Protección Civil y la Universidad Técnica de Lisboa. Estuvieron presentes en el acto la consejera Cristina Narbona y la directora técnica de Protección Radiológica, Fernanda Sánchez.

El protocolo, de duración indefinida, tiene como objetivo el intercambio de información y experiencia operativa y, especialmente, la colaboración entre las instituciones firmantes para establecer mecanismos de respuesta y el desarrollo de los recursos humanos y materiales para responder a posibles emergencias radiológicas o nucleares transnacionales. Se enmarca en la Directiva 2013/59/EURATOM que, en su artículo 99, recomienda la cooperación entre los Estados miembros con el objetivo de impulsar la cooperación internacional ante emergencias radiológicas y nucleares.

El Consejo de Seguridad Nuclear y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), firmaron el 23 de julio, en la sede del CSN, un convenio de colaboración con objeto de regular las actividades conjuntas de ambas instituciones en materia de información meteorológica, seguridad nuclear y protección radiológica. El convenio, que tendrá una vigencia de cuatro años prorrogables, fue firmado por

Convenio de colaboración con AEMET

el presidente de AEMET, Miguel Ángel López, y el del CSN, Fernando Marti Scharfhausen, quien estuvo acompañado por la consejera Cristina Narbona.

Este acuerdo incluye el intercambio de información técnica, asesoramiento y la optimización y uso conjunto de in-

fraestructuras. Se pretende además potenciar los estudios sobre clima y meteorología, seguridad nuclear y protección radiológica. Se trata de un convenio marco, que profundiza el firmado en 1989. Una comisión mixta, con presidencia alternativa de periodicidad anual entre el CSN y AEMET, realizará el seguimiento, aplicación y desarrollo del acuerdo, mediante convenios específicos.

Principales acuerdos del Pleno

Instalación para la fabricación de concentrados de uranio de la planta Retortillo

En su reunión del 8 de julio, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó por mayoría, con abstención de la consejera Cristina Narbona, la solicitud de autorización previa de la instalación para la fabricación de concentrados de uranio de la planta Retortillo, presentada por Berkeley Minera España, en los términos y con los límites y condiciones que se indican en el anexo del dictamen técnico presentado por la Dirección Técnica de Protección Radiológica.

Declaración de impacto del ATC

En su reunión del 15 de julio, el Pleno del CSN aprobó por unanimidad, a petición del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, informar favorablemente la evaluación del impacto radiológico al público del Almacén Temporal Centralizado (ATC) de combustible gastado y residuos de alta actividad, previsto en el término municipal de Villar de Cañas (Cuenca), de cara a la formulación por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de la Declaración de Impacto Ambiental de la instalación.

Restauración de terrenos en Palomares

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 22 de julio, aprobó por unanimidad el informe preliminar sobre los aspectos radiológicos de la restauración de los terrenos de Palomares, teniendo en cuenta la normativa de protección radiológica vigente y la práctica internacional, propuesto por la Dirección Técnica de Protección Radiológica.

Informe favorable de la solicitud de autorización previa del ATC

El 27 de julio, el Pleno del CSN aprobó por mayoría, con el voto en contra de la consejera Cristina Narbona, informar favorablemente la solicitud de autorización previa o de emplazamiento y la autorización de construcción del Almacén Temporal Centralizado (ATC) de combustible nuclear gastado y residuos de alta actividad en Villar de Cañas (Cuenca), presentada por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa). El objetivo de Enresa es obtener el reconocimiento oficial de la idoneidad del emplazamiento elegido y posibilitar la solicitud de la autorización de construcción. El informe contiene un anexo con 16 límites y condiciones impuestas por el CSN en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

Desclasificación de los residuos generados en instalaciones nucleares

En su reunión del 4 de septiembre, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó por unanimidad informar favorablemente el informe sobre el proyecto de orden ministerial por la que se regula la desclasificación de los residuos con muy bajo contenido radiactivo generados en instalaciones nucleares, entendiéndose por tales aquellos para los que el titular de la instalación no prevé ningún uso y a los que debe proporcionar una gestión adecuada, siempre que cumplan determinados criterios, excluyendo los materiales residuales líquidos y gaseosos, cuya evacuación al medio ambiente deba ser expresamente autorizada.

Sistema redundante de filtración del edificio de combustible de Almaraz

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 23 de septiembre, aprobó por unanimidad la solicitud del titular de la central nuclear de Almaraz de modificación de diseño para la implantación y puesta en servicio del sistema redundante de filtración del edificio del combustible de las dos unidades de la central, y los cambios de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento y las secciones del Estudio de Seguridad asociadas a la modificación, que resultó como consecuencia de la evaluación de la Revisión Periódica de la Seguridad.

Informe nacional de la directiva Euratom sobre gestión del combustible gastado y residuos radiactivos

En su reunión del 30 de septiembre, el Pleno del CSN aprobó por unanimidad el primer informe nacional de España para dar cumplimiento a la Directiva 2011/70/Euratom de 19 de julio de 2011, por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos. El informe señala que España ha incorporado a su ordenamiento jurídico los principios y obligaciones contenidos en la directiva e indica que se dispone de la infraestructura y la experiencia necesarias para la gestión segura del combustible gastado y de los residuos radiactivos. Para su elaboración se ha establecido un grupo de coordinación con representantes del CSN, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Enresa y Unesa y un grupo de trabajo interno en el CSN. ©

www.csn.es



Informe anual a las Cortes Generales

Cada año el Consejo de Seguridad Nuclear debe remitir al Congreso y al Senado un informe sobre el desarrollo de sus actividades en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. En él se detalla toda la información relevante del organismo, su estructura y funcionamiento, sus relaciones institucionales, sus actividades reguladoras y su labor de comunicación pública. El informe completo se puede descargar en pdf en:

<https://www.csn.es/relaciones-csn-con-las-cortes/informe-anual>



Exposición a radiación natural por radón

El radón es un gas radiactivo natural que en algunas regiones tiende a acumularse en las viviendas. Para conocer las zonas más expuestas se ha elaborado el mapa de exposición al radón en España. En la web del CSN se puede consultar el mapa y ampliar información sobre las medidas para evitar su excesiva concentración.

<https://www.csn.es/mapa-de-exposicion-al-radon-en-espana>



SISC

Los resultados más recientes del Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC) se pueden encontrar en: <http://www.csn.es/sisc-sistema-integrado-supervision-centrales-nucleares>

Actas del Pleno del CSN

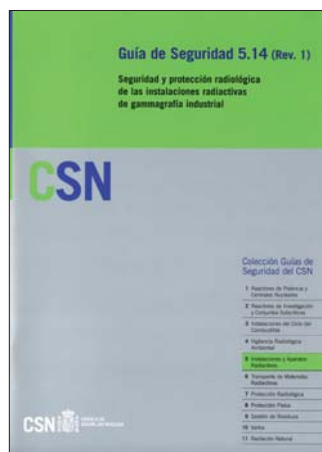
Para consultar las actas del Pleno del CSN, visite: <http://www.csn.es/csn/actas-del-pleno>

Alfa

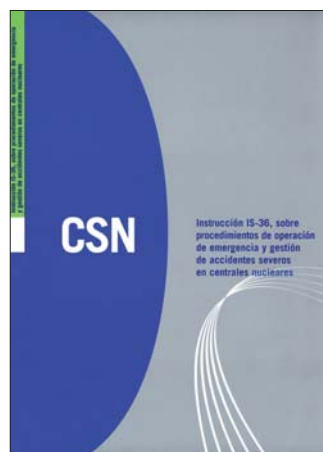
Puede acceder a los anteriores números de *Alfa*, revista de seguridad nuclear y protección radiológica en: http://www.csn.es/centro-de-documentacion?_20_folde-rld=13557&_20_viewEntries=1&_20_viewFolders=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview&_20_action=browseFolder&p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&_20_entryStart=0&_20_entryEnd=50&_20_folderStart=0&_20_folderEnd=100



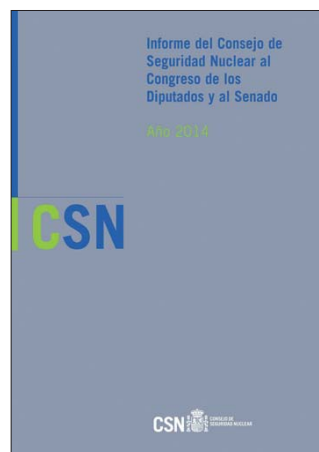
Publicaciones



Guía de Seguridad 5.14 (Rev. 1)
Seguridad y protección radiológica de las instalaciones radiactivas de gammagrafía industrial

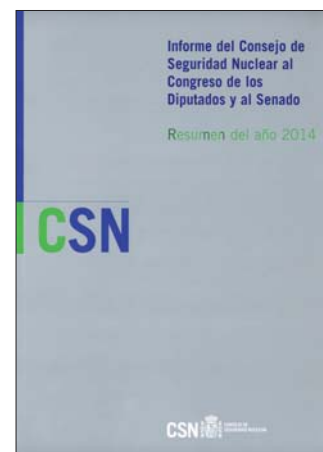


Instrucción IS-36, sobre procedimientos de operación de emergencia y gestión de accidentes severos en centrales nucleares



Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado
Año 2014

[Disponible también en inglés.]



Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado
Resumen del año 2014

[Disponible también en inglés.]



Implantación de sistemas para la eliminación del contenido radiactivo natural en las aguas de consumo humano



VIII Jornadas sobre calidad en el control de la radiactividad ambiental
Huelva, 11, 12 y 13 de junio de 2014

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

4 The paradoxical roots of fear

Why do we fear air travel but have no qualms about travelling by car, which is much more dangerous? Why do people put their life on the line practising adventure sports but fear harmless genetically modified foods? The nuclear and radiological safety issue provides us with an ideal opportunity to look at the psychological, cultural and social factors that influence our assessment of risk.

20 Nuclear safety opens up a path at Spanish universities

The CSN university chair programme sponsors the training and specialisation of professionals in nuclear engineering. Created ten years ago, the programme now sponsors four agreements with the polytechnic universities of Barcelona, Madrid and Valencia.

25 The renovation of a classic

Public information is one of the tasks commissioned to the CSN, as is reflected in the law by which the Council was set up. Particularly significant among the different activities carried out in this area are those corresponding to the Information Centre and its permanent educational exhibits. Now, after having received more than 100,000 visitors, some of the modules have been renovated.

44 At the forefront of technology

The construction of a new headquarters for the Central University Hospital of Asturias has made it possible to equip the centre with the most up to date radiotherapy and radiodiagnosis systems. Since the new hospital was inaugurated in June of last year, thousands of patients have benefitted from its state of the art technology.

54 The supermaterials factory

Europe and Japan are constructing a facility for the testing of materials that will make it possible to equip the nuclear fusion reactors of the future. Located in Rokkasho, in the north of Japan, it will allow a solution to be found to one of the key problems involved in making this energy technology a reality.

62 The promise of thorium

In the nineteen sixties, the United States built the first experimental reactor using thorium as a fuel, instead of uranium or plutonium, a technology that promised to be safer, cleaner and more efficient. Half a century later, this alternative remains in the experimental phase and does not look likely to go any further.

INSIDE THE CSN

9 Sub-directorate of Nuclear Facilities

This sub-directorate, which reports to the Technical Directorate for Nuclear Safety, is in charge of supervising the nuclear power plants operating in Spain and the Juzbado fuel manufacturing facility, as well as the transport of nuclear and radioactive materials.

30 RADIOGRAPHY

Management of the liquid radioactive wastes generated in nuclear medicine.

INTERVIEW

32 Cristina Narbona Ruiz, CSN counsellor

"Fukushima has led to additional safety measures that all the nuclear power plants are incorporating".

TECHNICAL ARTICLES

12 Estimate of doses to the populations of Spain as a result of medical radiodiagnosis

The DOPOES project, the result of an agreement between the CSN and the University of Málaga, has researched radiodiagnosis procedures in Spain, their frequency and the doses received by the patients over a period of 35 months. This article presents the results.

38 Non-destructive testing

Non-destructive testing has become an increasingly important tool for the performance of quality and safety analyses in numerous industrial fields, such as the nuclear, aeronautical, petrochemical and naval sectors, since it allows the quality of a product to be guaranteed or its operational status to be verified.



El Consejo de Seguridad Nuclear estrena web con mejores contenidos, mejor usabilidad y un diseño *responsive* que se adapta a todas las pantallas y a los nuevos terminales inteligentes.

Toda la información sobre seguridad nuclear y protección radiológica, de la mano del organismo regulador, ahora más fácil de navegar y con una estructura más clara.



www.csn.es