



LA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRÓN ALBA Y SUS NUEVAS LÍNEAS

ALBA es una fuente de luz de sincrotrón de tercera generación, ubicada en los alrededores de Barcelona. Su construcción, puesta en marcha y operación han supuesto un reto sin precedentes para la comunidad científico-técnica española. Actualmente, cumplidos los cinco años desde el inicio de las operaciones, ALBA se encuentra embarcada en un proceso de desarrollo de nuevas líneas experimentales. Este artículo describe ALBA en su conjunto, sus nuevas líneas, y hace particular énfasis en los aspectos relacionados con la protección radiológica.

INTRODUCCIÓN

ALBA es una fuente de luz de sincrotrón de tercera generación ubicada en Cerdanyola del Vallès, en las inmediaciones de Barcelona. Se trata de la infraestructura científica más compleja jamás construida en España [1]. Una instalación de este tipo consta de un complejo de aceleradores de partículas, que se utilizan para producir la luz de sincrotrón, y una serie de laboratorios especializados en su uso como herramienta de análisis, denominados *líneas de luz*. El correcto funcionamiento de aceleradores y líneas de luz requiere toda una serie de utilidades de apoyo que también forman parte íntegra de la instalación.

Este trabajo está organizado como sigue: en el apartado 2 se describe ALBA en general; el 3 ofrece una breve reseña histórica y explica su funcionamiento actual; el apartado 4 se abor-

dan las nuevas líneas de luz de ALBA, actualmente en diseño o construcción; el número 5 se detiene en los aspectos más relevantes desde el punto de vista de la protección radiológica; finalmente el apartado 6 ofrece las conclusiones.

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE ALBA

ALBA está situada en un terreno de unos 65.000 km², dentro de un parque que ha sido planificado para ir incorporando gradualmente otras infraestructuras científicas o empresas de carácter tecnológico. Las instalaciones se reparten entre un edificio principal con forma de anillo, del que emerge como un apéndice el edificio de oficinas, un edificio técnico anexo semienterrado y una nave almacén para usos complementarios. La Figura 1 ofrece una perspectiva general de los edificios de ALBA.

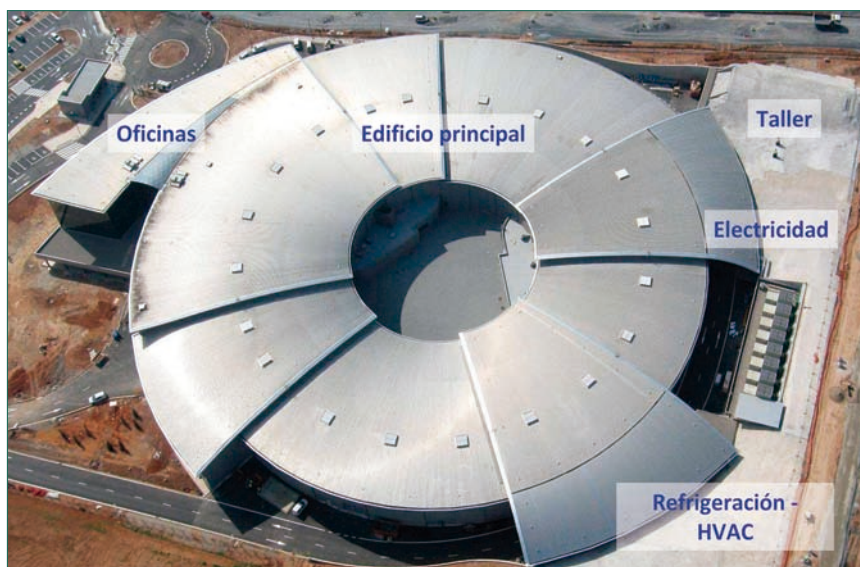


Figura 1. Vista aérea de los edificios de ALBA.

GASTÓN GARCÍA

Vicedirector
SINCROTRÓN ALBA

ARNAUD DEVIENNE

Técnico experto del Servicio
de Protección Radiológica
SINCROTRÓN ALBA

MARÍA JOSÉ GARCÍA

Jefe del Servicio de Protección
Radiológica
SINCROTRÓN ALBA

THE SYNCHROTRON ALBA LIGHT SOURCE AND ITS NEW LINES

ALBA is a third generation synchrotron light source located near Barcelona. Its construction, commissioning and operation have been an unprecedented challenge for the Spanish scientific-technological community. At the moment, five years after the onset of operations, ALBA is involved in process of new experimental beamline development. This paper describes ALBA as a whole, its new beamlines, and makes particular emphasis with aspects related to radiological safety.



Figura 2. Vista interior del búnker de hormigón, donde se observan los dos anillos aceleradores.

Dentro del edificio principal se ubica el complejo de aceleradores [2], encapsulado en un búnker de hormigón con forma de anillo. El complejo consta de tres aceleradores. El primero de ellos es lineal (Linac) y se utiliza para producir los electrones con una estructura pulsada y acelerarlos hasta una energía típica de 100 MeV. Cada paquete de electrones producido en el Linac es transferido al anillo propulsor (*booster*), que con una circunferencia cercana a los 250 m, mantiene cautivo el paquete durante unos 150 ms, proporcionando a los electrones energía adicional en cada vuelta, mediante una cavidad de radiofrecuencia, hasta alcanzar una energía de 3 GeV. En ese momento el paquete es transferido al tercer acelerador, denominado *anillo de almacenamiento* (SR). El SR tiene una circunferencia de 268 m y en él los paquetes de elec-

trones son sucesivamente inyectados desde el *booster* y mantenidos cautivos durante muchas horas. Su energía permanece estacionaria en 3 GeV, mediante un equilibrio dinámico entre la energía radiada en forma de luz sincrotrón, fin para el que el SR opera, y la que se repone a los electrones en seis cavidades de radiofrecuencia colocadas en puntos adecuados de anillo. El número de electrones almacenado en el anillo se mantiene también estacionario mediante un sistema de reinyección periódica (sistema denominado *top-up*) desde el *booster*. Los dos anillos aceleradores pueden verse en la Figura 2.

Los electrones que circulan por el SR a energías ultrarrelativistas atraviesan una serie de puntos donde campos magnéticos adecuados fuerzan trayectorias curvas y generan una emisión de luz sincrotrón, con carac-

terísticas espectrales, de polarización y temporales que proporcionan una herramienta muy versátil para el análisis de materiales en un amplio abanico de campos de aplicación. Cada uno de dichos puntos de emisión genera un haz de luz muy colimado y brillante que es guiado a una línea de luz, instalación experimental anexa al complejo de aceleradores y también alojada en el edificio principal.

Actualmente ALBA dispone de ocho líneas de luz en operación [3]. Todas ellas funcionan en paralelo y de forma independiente, si bien todas ellas dependen del correcto funcionamiento de los aceleradores para recibir la luz de sincrotrón que utilizan como herramienta de análisis. Las líneas actualmente en operación funcionan en base a diferentes técnicas de análisis [4]: microespectroscopía en el infrarrojo, difracción de polvo, microscopía de rayos X de campo completo, difracción a bajo ángulo, difracción de macromoléculas, absorción/emisión de rayos X, fotoemisión, dicroísmo magnético. Ello permite abordar experimentos en áreas científicas tan variadas como Biomedicina, Ciencia de materiales, Biología celular y estructural, Química, Catálisis, Física de la materia condensada, Magnetismo, Nanotecnología, Arqueometría, Ciencias medioambientales, etc. La Figura 3 muestra una perspectiva general de una de las líneas de luz de ALBA.

El funcionamiento de los aceleradores y líneas de luz se basa en una serie de subsistemas críticos de apoyo, cuya correcta operación y mantenimiento suponen un constante reto: sistemas de refrigeración proporcionando un alto grado de estabilidad térmica, sistemas de suptoración y alineamiento que garantizan la estabilidad mecánica, sistemas de vacío, sistema de control, sistemas de diagnóstico, sistemas de comunicación y gestión de datos, etc. Todos ellos se integran entre el edificio principal y el edificio técnico de apoyo y deben ser considerados, junto con los propios edificios, como parte íntegra del instrumento científico.

2. BREVE HISTORIA Y FUNCIONAMIENTO ACTUAL

La idea de construir una fuente de luz de sincrotrón en España data del inicio de la década de 1990. Tras un largo periodo de maduración, en 2002 se obtiene el acuerdo del Estado y de la comunidad autónoma para cofinanciar la construcción de ALBA. En 2003

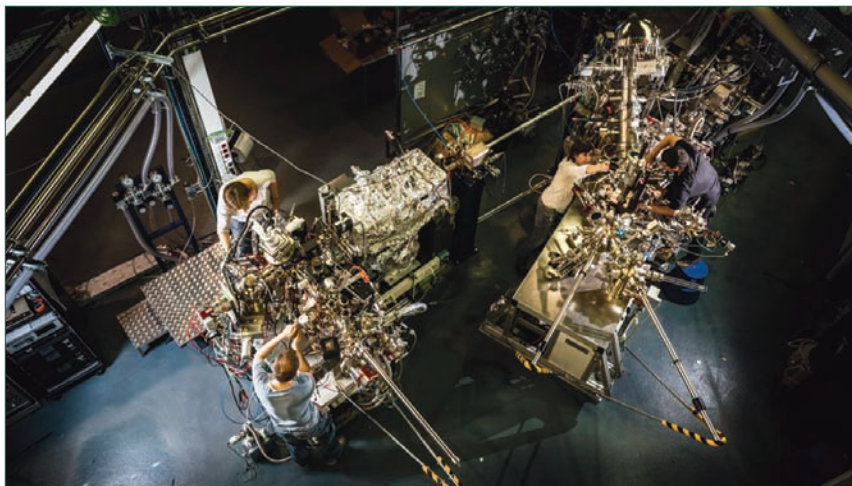


Figura 3. Perspectiva general de la línea de luz BL24-Circe en ALBA.

se crea un consorcio público (Consortio para la construcción, equipamiento y operación del laboratorio de luz sincrotrón, Cells) para gestionar el proyecto. A partir de este momento se va nucleando el equipo humano que llevará a cabo el proyecto y se suceden las fases del mismo: diseño (hasta 2006), construcción del edificio y sus instalaciones convencionales (hasta 2009), construcción e instalación de los equipamientos científicos (hasta 2010) y pruebas operativas (hasta 2012). En este último año llegan a ALBA los primeros experimentos oficiales, primero en la línea de luz BL29-Boreas, dedicada al estudio de materiales magnéticos, y gradualmente en cada una de las otras líneas inicialmente instaladas, hasta un total de siete. Por último en 2016, tras cuatro años de operación, entra en funcionamiento la octava línea de ALBA. Como se ha mencionado antes, actualmente hay tres líneas adicionales aprobadas, en distintas fase de diseño o construcción en el momento de escribir este artículo, con la previsión de las once líneas se encuentren operativas en 2020.

El funcionamiento de ALBA se organiza en función de convocatorias semestrales para proponer experimentos, dirigidas a la comunidad científica internacional. La selección de las propuestas que son aceptadas para llevar a cabo los experimentos es realizada por un panel científico independiente, según criterios centrados en la excelencia científica; y el acceso a la instalación es gratuito, con la obligatoriedad de poner en el ámbito público los resultados obtenidos. Existe una segunda modalidad de acceso que permite a las industrias mantener una estricta confidencialidad de sus resul-

tados para explotarlos comercialmente, y que implica un coste por hora de experimentación. Este modo de acceso, que es minoritario en todos los sincrotrones del mundo, se considera no obstante muy relevante desde el punto de vista de la contribución a la competitividad de las empresas. Es relevante tener presente que el uso directo de la luz sincrotrón no es la única ni seguramente la principal sinergia con las empresas generada por infraestructuras científicas de este tipo: la transferencia de conocimiento en general y de tecnología en particular, ligada a los desarrollos de instrumentación que constantemente se requieren para mantener los equipamientos científicos al día, es también un gran reto en el que comunidad científica e industria van de la mano y se benefician mutuamente.

Según el modelo descrito anteriormente, ALBA opera actualmente con sus ocho líneas de luz un total cercano a las 6.000 horas anuales, con un rendimiento cercano al 98%. Ello le permite recibir a unos 1.300 usuarios científicos al año para realizar sus experimentos y generar un número creciente de resultados científicos y tecnológicos.

3. LAS NUEVAS LÍNEAS DE ALBA

En el momento de escribir este artículo ALBA tiene aprobadas tres nuevas líneas, la primera de las cuales ya en fase de construcción, mientras que las otras dos están siendo diseñadas. En este apartado se hace una descripción de las nuevas líneas, se esbozan sus calendarios previstos de implementación y se citan algunos ejemplos de aplicaciones científicas que dichos instrumentos permitirán abordar.

La línea BL20-Lorea está dedicada a la técnica de fotoemisión con resolución angular (Arpes). Basada en la detección simultánea de la energía y dirección de emisión de los electrones emitidos por la muestra al ser iluminada con luz de sincrotrón, esta técnica permite obtener un mapa completo de las bandas del material estudiado. De este modo es posible estudiar en profundidad las propiedades electrónicas de materiales especialmente complejos y relevantes, como el grafeno, superconductores de alta temperatura o los materiales con propiedades topológicas. La Figura 4 ofrece una perspectiva general de la línea de luz BL20-Lorea, actualmente en fase de construcción y que se prevé entre en funcionamiento durante 2019.

La línea BL06-Xaira, actualmente en fase de diseño, permitirá llevar a cabo experimentos de cristalografía en macromoléculas mediante un haz con un tamaño al nivel de la micra. Esto hace posible abordar el análisis de sistemas que no permiten el crecimiento de cristales grandes, así como una amplia variedad de técnicas de medida que, por ejemplo, minimizan el daño en la muestra. Siendo la primera línea de ALBA que proporciona un haz micrométrico sobre el plano de la muestra, su construcción supone un importante reto. Está previsto que la línea entre en funcionamiento durante 2020.

La línea BL16-Notos es una apuesta de características singulares, no comparable a las dos líneas descritas anteriormente ni a ninguna de las ocho actualmente operativas en ALBA. En efecto, Notos ha sido concebida como una herramienta complementaria que permita abordar programas de desarrollo y pruebas de instrumentación variada, bien relacionada con la construcción de otras líneas de ALBA, bien con colaboraciones externas. Está previsto que entre el 20 y el 30 % del tiempo de haz disponible sea utilizado en proyectos internos o colaborativos de este tipo, mientras que el resto sería dedicado a realizar experimentos de absorción/emisión o de difracción, con una configuración experimental muy flexible que permita realizar experimentos sencillos de este tipo, para los que no sea necesario el alto grado de especialización de las líneas actualmente en funcionamiento en ALBA. La construcción de Notos canaliza la comunidad de usuarios y la instrumentación disponible en una de las ramas de la línea española actualmente en funcionamiento en

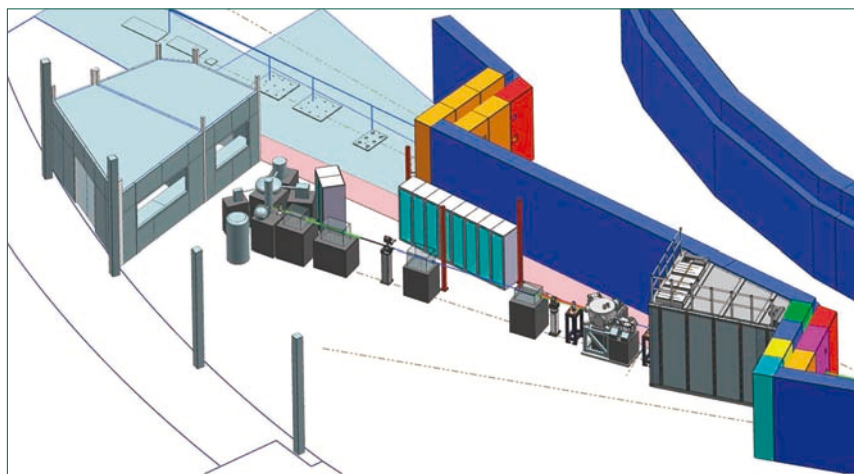


Figura 4. Perspectiva general del diseño de la línea de luz BL20-Lorea en ALBA.



el ESRF. Tras la reconstrucción del complejo de aceleradores, una de las dos ramas permanecerá en el ESRF y la otra será reconstruida en ALBA como parte de Notos, aprovechando las importantes sinergias entre los dos proyectos. La previsión es que Notos entre en funcionamiento durante 2020.

5. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN ALBA

Uno de los aspectos singulares que resulta interesante ilustrar en este trabajo es el tratamiento de la protección radiológica en ALBA. ALBA es una instalación radiactiva de primera categoría y sus características son totalmente singulares en España.

El riesgo más relevante es la irradiación externa generada por el haz de electrones acelerado y, posteriormente, almacenado a una energía de 3 GeV. En efecto, dicho haz de electrones genera un espectro muy amplio de radiación gamma, dominado por la radiación de frenado (*bremsstrahlung*) inducido por la interacción del haz de electrones con moléculas de gas residual en las cámaras de vacío. Los gammas así producidos generan en una segunda etapa neutrones a través de reacciones (γ, n) al interaccionar con los distintos materiales presentes en el entorno inmediato del haz (principalmente acero y cobre). Este campo mixto de radiación requiere un blindaje adecuado que aisle el sistema del aceleradores (túnel de aceleradores) de los espacios circundantes, un sistema de protección de personas con los enclavamientos adecuados que garanticen que ninguna persona puede acceder al interior del blindaje, y un sistema de monitorización que confirme de forma continuada que efectivamente el blindaje cumple su función de forma correcta. El túnel de aceleradores de ALBA se muestra en la Figura 5.

En los espacios anexos al perímetro exterior del túnel de aceleradores se encuentran ubicadas las líneas de luz. En ellas se reciben los haces de luz sincrotrón, con amplio espectro que se extiende a los rayos X. Dichas líneas requieren también medidas de blindaje y protección de personas adecuadas, si bien en este caso las condiciones son mucho menos severas que en el túnel de aceleradores y, por ello, las soluciones de blindaje adoptadas, como se explicará más adelante son muy diferentes.

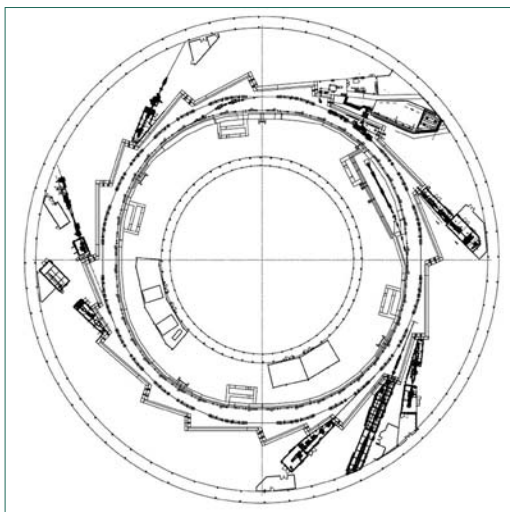


Figura 5. Plano en planta del túnel de aceleradores de ALBA, en el que también pueden verse las líneas de luz, ubicadas tangencialmente al perímetro exterior.

En un segundo plano se sitúa el riesgo inducido por la presencia de fuentes radiactivas encapsuladas, para verificación de monitores de radiación, así como la posibilidad de activar algunos elementos directamente en contacto con el haz de electrones. Estos riesgos se abordan regularmente mediante medidas administrativas,

siguiendo estrictos procedimientos.

El blindaje del túnel de aceleradores está constituido por un búnker de hormigón, con geometría de anillo. Paredes y techo presentan espesores en el rango 1-1,5 m, con una combinación de hormigón estándar y baritado, éste último con densidades cercanas a 3,5 g/cm³. La Figura 6 ilustra la configuración del blindaje en el túnel de ALBA, donde puede verse que el techo removable para acceso técnico. Se ha reforzado especialmente toda la zona ligada al punto de inyección entre *booster* y anillo de almacenamiento, ambos aceleradores alojados dentro del mismo túnel.

Las condiciones de irradiación externa generadas en las líneas de luz de ALBA son mucho menos severas y en este caso el espectro está fuertemente dominado por el campo de gammas. Por ello y por las restricciones de espacio existentes, se opta por cabinas con paredes de plomo, como se puede ver en la Figura 7. Los espesores están en un rango típico de unos milímetros a pocos centímetros, según las necesidades en cada punto de acuerdo con el mapa de radiación presente.



Figura 6. Configuración del blindaje en el túnel de ALBA.



Figura 7. Vista panorámica de las cabinas de blindaje de la línea BL11-NCD de ALBA.



Tanto el túnel de aceleradores como las cabinas de protección de las líneas de luz están integrados en un sistema de protección de personas (PSS). El PSS de ALBA está basado en PLC y proporciona sistemas de enclavamiento que garantizan que no puede haber personas dentro de los espacios correspondientes cuando los campos de radiación están presentes en los mismos. Esto se obtiene mediante de aplicación de reglas lógicas que vinculan a puertas de acceso, botones de búsqueda y emergencia, controles sobre equipos críticos, etc., de una manera diversa y redundante. De este modo la eventualidad de que se produzca un accidente depende de la materialización de dos fallos de sistemas inherentemente seguros e independientes entre sí, reduciendo de este modo la probabilidad a valores suficientemente bajos, conforme al criterio Alara.

Como tercera barrera de seguridad, ALBA combina una amplia red de monitores de área, ubicados en el entorno inmediato del complejo formado por aceleradores y líneas de luz. Dichos monitores de área miden de forma continua la dosis generada por los campos de gamma y neutrones. En la eventualidad de que la dosis integrada dentro de una ventana de cuatro horas rebase un límite de dosis establecido (actualmente 2 μSv , valor que se corresponde con los niveles de público asumiendo una presencia anual conservadora de 2.000 h. en la zona de exposición), los monitores generan una señal de parada automática que detiene los aceleradores a través del PSS, no autorizando el rearmado de permisos hasta que se complete la ventana de cuatro horas establecida y garantizando así que se respeta el nivel de público en el exterior de los espacios protegidos de forma directa por el sistema de accesos del PSS. La experiencia acumulada indica que estos eventos de bloqueo inducido por monitores de radiación se dan con carácter absolutamente excepcional.

Por último ALBA cuenta con un sistema de dosimetría personal combinado con una amplia red de dosímetros de área que mensualmente confirman, con carácter redundante, que

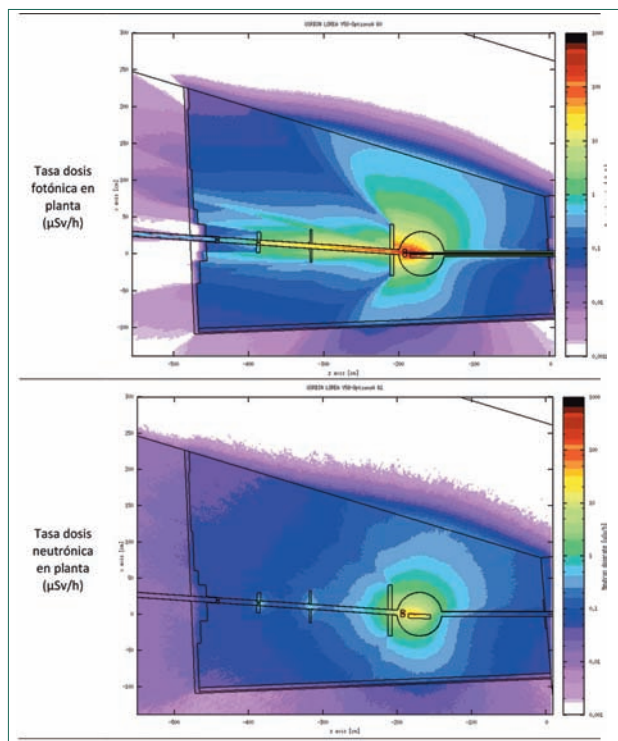


Figura 8. Mapa de tasa de dosis de gammas (superior) y neutrones (inferior) en la cabina de protección radiológica diseñada y actualmente en construcción para la línea de luz BL20-Lorea, obtenida a partir de simulación Montecarlo.

todas las medidas descritas anteriormente consiguen de manera efectiva y segura garantizar una tasa de dosis por debajo del nivel establecido legalmente para el público.

En la actual fase de expansión ya descrita en el apartado anterior, ALBA extiende su sistema de blindaje y protección con la incorporación de nuevas cabinas para cada una de

las nuevas líneas de luz. La Figura 8 ilustra el tipo de simulaciones que se llevan a cabo. El mapa de tasa de dosis se ha obtenido simulando los eventos de producción de radiación más relevantes compatibles con la dinámica del complejo de aceleradores de ALBA mediante el código de cálculo Monte Carlo Fluka [8, 9]. El mapa ilustra perfectamente el origen de la emisión, que procede del cono de *bremsstrahlung* cuyo eje se corresponde con la disposición longitudinal de la línea (es decir, la dirección del haz de fotones que se utiliza para llevar a cabo los experimentos). Como puede observarse los espesores de plomo asignados a las paredes y techo de la cabina son suficientes para garantizar un nivel de público en el exterior de la misma.

CONCLUSIÓN

Transcurridos cinco años desde el inicio regular de operaciones con usuarios científicos externos, ALBA equilibra estrictos requerimientos de estabilidad, eficiencia y seguridad operativas con un ambicioso programa de expansión. Única en España, tanto desde el punto de vista de sus características como en los aspectos de protección radiológica, ALBA supone un reto sin precedentes que ejemplifica el salto cualitativo dado por el sistema español de ciencia y tecnología a lo largo de las últimas dos décadas. ■

- [1] G. García, A. B. Martínez, S. Ferrer, I. Ramos, *Revista española de Física* 30-2 (2016) 52-59.
- [2] J. Bordas et al., *NIM A* 543 (2005) 28-34.
- [3] <https://www.cells.es/en/beamlines>
- [4] S. Mobilio, F. Boscherini, C. Meneghini, *Synchrotron radiation: basics, methods and applications*, Springer (2015).
- [5] <https://www.cells.es/es/beamlines/en/beamlines/lorea-beamline-proposal>
- [6] https://www.cells.es/es/beamlines/en/beamlines/phase-iii-beamlines-1/2014_10_1_microfocus-mx-bl-alba-phase-iii.pdf
- [7] https://www.cells.es/es/beamlines/en/beamlines/phase-iii-beamlines-1/2014_10_2_notos-test-bl-alba-phase-iii.pdf
- [8] G. Battistoni, S. Muraro, P.R. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, S. Roesler, A. Fasso, J. Ranft, "The FLUKA code: Description and benchmarking", *Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006*, Fermilab 6--8 September 2006, M. Albrow, R. Raja eds., AIP Conference Proceeding 896, 31-49 (2007).
- [9] A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft, "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.