

INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINAR BASADA EN EL USO DE ACELERADORES DE PARTÍCULAS: EL CENTRO NACIONAL DE ACELERADORES

José María López Gutiérrez
Director del Centro Nacional de Aceleradores

Rafael García Tenorio
Vicedirector del CNA

RESUMEN

En este artículo se lleva a cabo un análisis descriptivo a distintos niveles del *Centro Nacional de Aceleradores*, dedicado fundamentalmente a la realización de investigaciones multidisciplinares basadas en el uso de aceleradores de partículas y equipos asociados. En el artículo se hace así referencia a las seis instalaciones principales que posee este centro y a las distintas líneas de investigación asociadas a ellas. Igualmente se describe la estructura de recursos personales que posee, y que integra un conjunto de sesenta personas, mencionándose igualmente las características orientadas a los usuarios externos del centro a través de las actividades de carácter transversal que desarrolla y a las colaboraciones estratégicas con empresas e instituciones que viene poniendo en práctica en los últimos años.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro Nacional de Aceleradores es parte de una Instalación Científico-Técnica Singular (ICTS) dedicada a la realización de investigación multidisciplinar basada en el uso de aceleradores de partículas y equipos asociados. Pertenece a la ICTS distribuida IABA (Instalaciones de Aplicaciones Basadas en Aceleradores), que está formada por los nodos CNA en Sevilla y CMAM (Centro Microanálisis de Materiales) en Madrid.

El CNA tiene su origen en un convenio entre la Universidad de Sevilla, la Junta de Andalucía y el CSIC firmado en el año 1999. La Junta Rectora del centro, constituido por representantes de las tres instituciones, fija la estrategia general y las cuestiones de política del centro, de las que se encarga el Director. También existe un Comité Científico, con científicos externos al Centro propuestos por las tres instituciones, que asesora al director sobre la estrategia científica.

El personal científico del Centro se distribuye en Unidades de Investigación, que cuentan con profesionales de las diferentes instituciones. Estas unidades se organizan en torno a las diferentes infraestructuras y capacidades del centro. Además, existe una Unidad Administrativa y una Unidad Técnica que presta apoyo administrativo y técnico al centro y a los usuarios externos.

Toda la investigación se lleva a cabo con base en las seis instalaciones principales del centro. Estas instalaciones y las líneas de investigación asociadas a ellas se presentan y resumen en las siguientes secciones. El CNA, tras su continua expansión a principios del siglo XXI con la instalación de nuevo equipamiento, se encuentra en la actualidad en un periodo de madurez suficiente para obtener el máximo rendimiento de éste.

Pelletron 3 MV Tandem Accelerator: Es el primer acelerador instalado en el centro y está enfocado principalmente a la caracterización y modificación de materiales mediante técnicas IBA (Ion Beam Analysis) y a la implantación de iones, así como al estudio, caracterización y desarrollo de instrumentación nuclear, especialmente detectores de radiación (ver Figura 1).



Figura 1.- Acelerador 3 MV Tándem del CNA

El acelerador está equipado con tres fuentes de iones diferentes, y en la actualidad cuenta con un total de ocho líneas de haz diferentes y consolidadas, cada una diseñada con objetivos específicos: a) Línea Básica de Física Nuclear, b) Línea de Microsonda, c) Línea de uso múltiple para experimentos de IBA, d) Línea de irradiación e implantación, f) Línea de canalización, g) Línea externa, h) Línea de baja energía para experimentos de implantación de iones y para el análisis de material centelleador mediante la técnica de ionoluminiscencia a bajas energías, e i), una línea de neutrones denominada HISPANOS (Hispanis Neutron Source), la primera instalación de neutrones basada en acelerador en España, que permite realizar investigación con haz de neutrones pulsados mediante la técnica del tiempo de vuelo. Esta nueva línea ha demandado la actualización de la instalación Tándem de 3 MV para producir haces de iones pulsados, abriendo nuevas perspectivas y nuevas líneas de investigación.

Podemos aplicar diferentes técnicas de IBA, así como la técnica de ionoluminiscencia (IL) que analiza la luz emitida por una muestra bombardeada con un haz de iones, y la técnica de carga inducida por haz de iones (IBIC) que permite estudiar las propiedades de transporte en detectores de semiconductor. A través de esta instalación, el CNA también tiene capacidad para la implantación de iones de materiales a baja y alta energía, y para realizar trabajos de irradiación con iones analizando los efectos producidos por el bombardeo. Además, se han abierto nuevas líneas de investigación en campos muy diferentes con la línea de neutrones pulsados, cubriendo un vacío existente hasta su creación en el país. Esta línea de neutrones ha tenido muy buena acogida por parte de la comunidad científica española que trabaja con neutrones. Por último, la microsonda nuclear del CNA se ha sometido a una importante actualización para ampliar sus capacidades operativas. Esta mejora incluye la instalación de un nuevo sistema informático para el control operativo de la microsonda, la actualización del software para la adquisición de datos y la instalación de un digitalizador para mejorar la funcionalidad del sistema de adquisición de datos.

La capacidad de toda la instalación de 3 MV ganará en un futuro próximo con la instalación de una nueva fuente de iones pulsados de alta intensidad y brillo, abriendo nuevos retos en algunas líneas (especialmente en la línea de neutrones). La adquisición de esta fuente de iones ha sido financiada recientemente por la AEI.

Ciclotrón 18/9: Fue el segundo acelerador instalado en CNA y proporciona protones a 18 MeV y deuterones a 9 MeV. Este acelerador cuenta con ocho puertos de irradiación, de los cuales siete están dedicados a la producción de radionúclidos emisores de positrones. De esta manera, el CNA ofrece la posibilidad de producir radiofármacos basados en radioisótopos utilizados en la técnica de imagen médica PET (ver Figura 2).



Figura 2.- Acelerador 18/9 Ciclotron del CNA

El ciclotrón se utiliza para la producción comercial de radiofármacos, en su mayoría basados en ^{18}F , que se distribuyen en la mayoría de los hospitales del sur de España y Portugal. Este trabajo es realizado por la empresa Curium a través de un contrato competitivo que proporciona al CNA fondos para la financiación del centro y para la contratación de personal.

En asociación con el Ciclotrón, el CNA cuenta con un laboratorio de investigación y otro de control de calidad donde se preparan radiofármacos PET para estudios clínicos y preclínicos. Estos laboratorios cuentan con todo el equipamiento necesario para la síntesis, purificación y control de los radiofármacos generados. La unidad de investigación de radiofarmacia del CNA es la primera unidad de radiofarmacia autorizada en Andalucía, siguiendo los requisitos de la Consejería de Sanidad. Esta unidad produce mayoritariamente radiofármacos para investigación preclínica a petición de los usuarios externos, aunque algunas síntesis han sido validadas para la práctica clínica.

Sólo un puerto no está dedicado a la producción de radiofármacos. En el puerto 8, hay una línea de salida: una línea experimental que transporta el haz a una segunda bóveda. Esta línea de haz externo es útil cuando la investigación requiere energías de protones y deuterones por encima de 6 MeV, siendo una línea versátil que puede ser modificada con los elementos necesarios para cada investigación sin demasiada complejidad. Esta línea externa de ciclotrón se utiliza especialmente en la investigación de irradiación, en la caracterización de detectores e instrumentación cuando se necesitan energías superiores a las suministradas por el tándem de 3 MV, en experimentos relacionados con la hadronterapia y en experimentos de radiobiología que analizan el comportamiento de las células bajo la irradiación con protones.

PET y TC de pequeños animales / PET/TC humano: Los radiotrazadores generados en el Centro se pueden utilizar en las instalaciones de imagen asociadas con las que también cuenta el CNA. El centro posee un escáner PET para animales pequeños basado en cristales GSO que son leídos por una matriz hexagonal de fotomultiplicadores. El escáner funciona en modo 3D y la resolución espacial es de 2,7 mm en el centro. El CNA dispone también de un micro TAC preclínico que permite obtener imágenes con una resolución espacial de 200 micrómetros. Este equipo se utiliza principalmente para obtener

imágenes de tomografía computarizada (TC) con rayos X de pequeños animales, pero también de objetos de interés tecnológico y arqueológico.

El sistema CT está equipado con camas de exploración que son totalmente compatibles con el escáner PET. De este modo, es posible la adquisición secuencial de imágenes con ambas técnicas PET/CT en animales de experimentación y obtener una imagen PET/CT multimodal única.

El CNA también cuenta con un PET/CT para humanos que permite recibir pacientes en el CNA. Permite estudios muy flexibles para: i) PET/CT estándar de cuerpo entero, ii) PET dinámicas, iii) TC dinámicas, iv) PET/CT con control respiratorio y v) PET/CT con control cardíaco. Existe un convenio con el hospital público Virgen Macarena para utilizar y apoyar esta unidad de investigación en el CNA, de tal manera que 3 días a la semana se escanean pacientes hospitalarios de interés para la investigación en el CNA, mientras que los otros 2-3 días, el servicio de Hospital proporciona el personal calificado necesario para los estudios en humanos propuestos por personal no hospitalario.

El CT para humanos ha encontrado otra aplicación que está siendo explotada al máximo gracias a la colaboración con el IAPH (Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico). El TC se utiliza para el escaneo de esculturas e imágenes religiosas de alto valor patrimonial con el fin de evaluar su estado y decidir posibles vías de restauración.

Acelerador 1 MV Tandetron (AMS): La unidad AMS del CNA está operando el único espectrómetro de masas con acelerador disponible en España que permite la detección de un amplio grupo de radionucleidos que se encuentran en cantidades muy pequeñas en la naturaleza o en diferentes materiales. Este equipo se aplica para la determinación a los isótopos que son muy difíciles de detectar mediante técnicas radiométricas porque tienen vidas medias muy largas (véase la Figura 3).



Figura 3.- Acelerador 1 MV Tandetron (AMS) del CNA

La técnica AMS es más sensible que cualquier otra técnica de detección de radionúclidos naturales y artificiales de larga vida, lo que la hace muy eficaz en muchos estudios científicos que no se pueden hacer de otra manera.

Los radionucleidos de larga vida determinados por AMS son variados. La instalación CNA (un espectrómetro de masas con acelerador compacto de baja energía) fue diseñada para la medición de ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{129}I , ^{239}Pu y ^{240}Pu , pero diferentes actualizaciones y el alto nivel alcanzado por el personal de la unidad han aumentado la sensibilidad del sistema, lo que ha permitido agregar ^{41}Ca , ^{233}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{241}Am , ^{242}Pu y ^{243}Am a la lista. En la actualidad, el CNA es el segundo centro de investigación de Europa en número de radionucleidos incluidos en su cartera que utilizan AMS de baja energía e incluso se espera un incremento en la capacidad de esta instalación debido a que se realizará una nueva actualización

mediante la instalación de un nuevo sistema de inyección que permitirá aumentar la eficiencia del sistema. Esta mejora ha sido financiada recientemente por la AEI. Por todo ello el uso del sistema AMS del CNA tienen un carácter muy internacional, siendo por ejemplo CNA colaborador oficial del Organismo Internacional de Energía Atómica en determinaciones de AMS en estudios marinos.

Con este sistema, denominado SARA (Spanish Accelerator for Radionuclide Analysis), se siguen dos líneas de investigación principales, siendo la primera la dedicada a la determinación de radionucleidos de larga vida en muestras ambientales, para utilizar la información obtenida en estudios oceanográficos, de cambio climático y de evaluaciones antropogénicas. El papel de los radionúclidos como trazadores, marcadores e incluso relojes de diferentes procesos ambientales hacen que su determinación sea muy útil y demandada.

La segunda aplicación con una demanda creciente en los últimos años es la determinación mediante AMS de radionucleidos que no pueden ser detectados por técnicas radiométricas en material procedente del desmantelamiento de reactores comerciales de energía nuclear. Estas determinaciones son muy exigentes debido a la complejidad de la matriz a partir de la cual se aísla el radionúclido que se va a medir, pero tienen un impacto socioeconómico muy alto ya que a partir de los resultados obtenidos se puede obtener información sobre materiales que permitan su eliminación en repositorios convencionales o incluso su reciclaje, en lugar de ser tratados en la mayoría de los casos por seguridad como materiales radiactivos si no se realizan las determinaciones de AMS. El CNA está trabajando activamente en esta línea en colaboración con la empresa ENRESA y empezamos a tener también demanda de usuarios externos internacionales porque el número de instalaciones europeas de AMS que ofrecen este tipo de estudios es extremadamente escaso.

Sistema Micadas: La quinta instalación del centro es el llamado sistema Micadas, un instrumento diseñado específicamente para mediciones de ^{14}C . Su diseño y funcionamiento siguen el esquema básico de otras instalaciones de AMS, pero los diferentes parámetros y características del sistema están fijados para una determinación precisa de ^{14}C . Micadas determina de forma precisa la relación $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ en las muestras, midiendo los diferentes isótopos de C en diferentes partes del sistema.

El sistema Micadas está diseñado para medir muestras que incluyen toda la gama de posibles aplicaciones arqueológicas y medioambientales y, en comparación con otros sistemas AMS, proporciona una datación por radiocarbono de alta precisión con un sistema muy compacto, robusto y amigable para el usuario.

Las muestras (arqueológicas, artísticas, históricas, etc.) se pueden datar por ^{14}C en el CNA. Asociado al sistema Micadas, existe un Servicio de Datación por Radiocarbono que incluye un laboratorio totalmente equipado para la preparación de muestras, el primero de este tipo en España porque se adapta a las condiciones y necesidades de AMS: los tamaños de las muestras a tratar se reducen a una escala de submiligramos, mientras que las mediciones de las muestras se realizan en menos de una hora, permitiendo la producción de una alta tasa de datación. El servicio de datación ^{14}C del CNA es un referente en España y está siendo utilizado por un gran número de grupos de investigación dedicados a los estudios arqueológicos, históricos y medioambientales. El servicio mide todo tipo de muestras orgánicas (semillas, huesos, madera...) y está entrando en el estudio de la posible datación ^{14}C de morteros.

El servicio ^{14}C también ofrece un campo de aplicación diferente en el que se utiliza el ^{14}C como base de una técnica forense. Las determinaciones de ^{14}C en alícuotas submilimétricas de piezas de marfil permiten determinar si el origen de este marfil es anterior o posterior a la era de las pruebas de armas nucleares (años 50-60 en el siglo XX) y, en consecuencia, si la posesión y el tráfico de este marfil es ilegal o no. CNA es ahora colaborador oficial del Ministerio de Transición Ecológica en el plan TIFIES, luchando específicamente contra el tráfico ilegal de marfil. Periódicamente recibimos muestras de marfil para su análisis en el marco de esta colaboración.

Una nueva línea de investigación se encuentra actualmente en fase de consolidación final: la determinación de ^{14}C en muestras líquidas. Esta nueva línea se ha abierto debido a la demanda del sector nuclear por la necesidad de determinaciones de este radionúclido en los sistemas acuáticos que rodean los reactores nucleares, y en las aguas y líquidos generados durante el proceso de desmantelamiento de los reactores nucleares. Este es un ejemplo típico de la continua adaptación de la investigación realizada en las diferentes instalaciones del CNA a las demandas de la comunidad científica y de la sociedad en general.

Irradiador de ^{60}Co -Laboratorio de Radiación Gamma: Por último, el CNA también está equipado con un laboratorio basado en un sistema de irradiación de fotones gamma (RadLab). Esta instalación complementa la investigación en irradiación iónica desarrollada con los aceleradores de 3 MV Tándem y Ciclotrón. Además de la aplicación aeroespacial, la instalación también se utiliza para aplicaciones en física de altas energías, ciencia de materiales, biomedicina y agricultura.

El laboratorio está ubicado en una sala especialmente diseñada para cumplir con la normativa vigente en materia de protección radiológica. En esta sala, el CNA dispone de uno de los equipos de radiación gamma para investigación más versátiles, el modelo GammaBeam X200 que contiene una fuente de cobalto-60 con una actividad de 181 TBq en febrero de 2013. Ajustando la distancia de la muestra a la fuente (mínimo 50 cm) y mediante un atenuador, es posible obtener un amplio rango de tasa de dosis de 0,05 a 200 Gy/h. El tamaño del campo de irradiación también es variable, siendo el campo mayor de $140 \times 140 \text{ cm}^2$ a la distancia máxima de la fuente.

En RadLab, los procedimientos de calibración y dosimetría se realizan en total cumplimiento, ya sea en agua o en aire, con los protocolos TRS-368 y TRS-469 del OIEA, y los procedimientos dosimétricos participan con éxito en ejercicios de intercomparación internacionales.

El sistema se ha actualizado con la capacidad de realizar experimentos de irradiación a baja y alta temperatura, e incluso a temperatura variable durante el experimento. También se explota la aplicación de esta unidad para la obtención de imágenes (gammagrafía), con un creciente interés por parte de los colectivos que trabajan en el patrimonio cultural.

Desde su instalación la dimensión internacional de esta instalación ha ido continuamente creciendo gracias a una serie de colaboraciones y al aumento de la utilización del sistema por parte de los grupos europeos. Además, se ha desarrollado una aplicación de machine-learning que está en pleno funcionamiento contando con la base de datos parametrizada internacional más extensa sobre datos de radiación para componentes electrónicos, que hoy en día es utilizada o demandada por instituciones internacionales debido a su utilidad.

2. INFORMACIÓN ADICIONAL

Para el funcionamiento de las seis instalaciones descritas, el CNA cuenta con una plantilla de 60 personas, entre investigadores, técnicos altamente cualificados, doctorandos y administrativos, todos ellos con la idea clara de que el CNA es un centro de investigación transversal basado en aceleradores y sus aplicaciones. Las características orientadas al usuario del centro se reflejan en el hecho de que todas las instalaciones están disponibles para usuarios externos y en que un conjunto de técnicos cualificados con nivel de doctorado se encarga de ayudar a los usuarios externos a cumplir sus objetivos.

El carácter transversal del centro y las numerosas aplicaciones disponibles también ha permitido establecer colaboraciones estratégicas con empresas e instituciones. Tenemos convenio con la empresa Curium (para la producción de radiofármacos), con el Servicio Andaluz de Salud (en asociación al uso de las instalaciones de imagen médica), con Alter Technology (irradiación gamma de dispositivos aeroespaciales) y con la empresa ENRESA (para la caracterización AMS de material desmantelado en

reactores de energía nuclear). Además, somos colaboradores oficiales del OIEA (AMS: determinaciones en ambientes marinos) y del Ministerio de Transición Ecológica español (determinaciones ^{14}C luchando contra el tráfico ilegal de marfil). Es importante destacar también que se ha firmado una Memoria de Entendimiento entre el CNA y el IFMIF-DONES con el fin de tener una base para establecer una colaboración definida y consolidada entre ambas instituciones. CNA apoya claramente en la medida de lo posible a IFMIF-DONES como instalación internacional estratégica en nuestro país.

El personal investigador del centro es el principal responsable de la mejora de las instalaciones para tenerlas plenamente operativas y poder realizar investigaciones actualizadas. Estos investigadores llevan cabo proyectos financiados en convocatorias nacionales y autonómicas y cuentan con una densa red de colaboraciones a nivel nacional, originadas en parte por la interacción con usuarios externos del centro. Sin embargo, además, la dimensión internacional de la investigación realizada por este personal está creciendo exponencialmente durante la última década, hecho reflejado en colaboraciones internacionales y en la participación en proyectos europeos. En el periodo 2021-2024, el CNA ha participado en cinco proyectos de investigación de la Unión europea diferentes, ofreciendo en algunos de ellos acceso transnacional a grupos de investigación y empresas europeas.

Por último, queremos destacar las actividades de divulgación que se reflejan en las visitas semanales de estudiantes de bachillerato al centro, la realización de notas de prensa mensuales y la participación en cualquier evento que ayude a difundir las actividades del CNA y la cultura científica en general (semana de la ciencia, noche de los investigadores...). Estas actividades complementan todas las acciones del centro tratando de devolver a la sociedad sus inversiones y confianza. La Unidad del CNA dedicada a la difusión de la Cultura Investigadora está reconocida con el certificado UCC+I otorgado por Fecyt.