

SERIE PONENCIAS



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

**ADOPTA CIENCIA.
LA TECNOLOGÍA RESPONDE
A LOS RETOS DE LA SOCIEDAD**

Coordinador:

Marcos Lafoz Pastor

Publicación disponible en el [Cátalogo general de publicaciones oficiales](#).

© CIEMAT, 2023

NIPO: 832-23-003-8



Maquetación y Publicación:

Editorial CIEMAT

Avda. Complutense, 40 28040-MADRID

Correo: editorial@ciemat.es

[Novedades editoriales CIEMAT](#)

El CIEMAT no comparte necesariamente las opiniones y los juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier parte de este libro por cualquier medio electrónico o mecánico, actual o futuro, sin autorización por escrito de la editorial.

No está permitida la publicación de este documento en cualquier dominio que no pertenezca al CIEMAT.

AGRADECIMIENTOS

La tercera edición de la iniciativa Adopta Ciencia, celebrada en el CIEMAT el 14 de abril de 2023, ha sido posible gracias a la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), por financiar parte de los gastos; a la División de Gestión del Conocimiento por dedicar esfuerzo a coordinar los distintos grupos involucrados, contactar con los centros educativos y potenciales interesados, gestionar las inscripciones y estar pendientes de toda la logística necesaria; a la Unidad de Comunicación y Relaciones Públicas del CIEMAT, por encargarse de la difusión del evento y ayudarnos con aspectos logísticos durante la presentación de la jornada; al Departamento de Tecnología, en cuyas actividades se ha centrado esta edición de Adopta Ciencia, por su apoyo y su colaboración desde la dirección, las divisiones y unidades; y en especial a los Talleres Generales que han cedido amablemente sus espacios y su ayuda para el desarrollo de la jornada de divulgación científica.

Hay que agradecer muy especialmente el éxito del evento a los profesionales de Chuf Creativos y Documfy, quienes han participado muy activamente en todas las fases del proceso de realización, con sus buenas ideas, su profesionalidad y su creatividad, todo lo cual ha contribuido a que el evento haya sido un éxito.

También me gustaría agradecer a todos los centros educativos que han participado en la jornada, así como a los trabajadores y trabajadoras del CIEMAT que han sentido curiosidad por conocer más en detalle lo que se hace en nuestro Centro. Esperamos que haya sido del interés de todos, que haya servido para conformar una idea más concreta de la utilidad de nuestros desarrollos y sobre todo a que todos y todas se sientan parte del resultado final.

Sin embargo, los agradecimientos más especiales van para Jorge, Silvia, Óscar, Marta y Jesús, los investigadores del Departamento de Tecnología que han sido los auténticos protagonistas de esta aventura, quienes durante meses han preparado con esmero la jornada y que se han tomado en serio el hecho de que la divulgación no es sólo una tarea colateral de los investigadores sino una de sus principales responsabilidades, contribuyendo así al avance del conocimiento y acercando la ciencia a la sociedad.

La suma del esfuerzo y el empeño de toda esta gente ha contribuido a que Adopta Ciencia III: Tecnología, impulso social haya sido un éxito rotundo y haya llegado a tanta gente. Esperamos veros en la próxima edición.

Marcos Lafoz Pastor

Científico del CIEMAT y
Coordinador de ADOPTA CIENCIA III

PRÓLOGO

Adopta Ciencia es un proyecto de difusión de la ciencia, y cuando hablamos de este concepto nos referimos al proceso de comunicar el conocimiento científico y los resultados de la investigación al público en general, a los encargados de formular políticas y a otros no expertos de una manera accesible y comprensible.

La divulgación desempeña un papel crucial para cerrar la brecha entre la comunidad científica y la sociedad en general, fomentando la comprensión pública de los avances científicos y sus implicaciones. La difusión científica efectiva promueve la transparencia, la confianza y la toma de decisiones informada.

CIEMAT, como centro de investigación que trabaja en la energía, el medio ambiente y la tecnología y dado su carácter de entidad pública, tiene entre sus objetivos principales difundir los avances y el conocimiento existente en las áreas mencionadas, con el público y las partes interesadas más relevantes.

CIEMAT lleva a cabo proyectos de I+D+I en campos muy actuales, y con una implicación social importante. Como centro de investigación, el CIEMAT realiza estudios científicos para comprender problemas complejos, esto implica aplicar métodos científicos para recopilar datos, realizar experimentos y analizar resultados. Los conocimientos obtenidos en estos proyectos científicos se utilizan luego para desarrollar y mejorar diversas tecnologías.

A través de su investigación, el CIEMAT contribuye al avance del conocimiento científico que, a su vez, alimenta las innovaciones tecnológicas. A medida que el CIEMAT desarrolla nuevas tecnologías, genera otras investigaciones científicas, creando un circuito de retroalimentación positiva entre la ciencia y la tecnología.

La divulgación científica se vuelve imprescindible en este contexto para compartir los resultados de la investigación y las tecnologías que desarrolla con la comunidad en general.

Mediante la difusión de información a través de diversos canales como publicaciones, seminarios, charlas públicas, programas educativos y divulgación en los medios, CIEMAT ayuda a dar a conocer sus contribuciones científicas y los beneficios de las tecnologías que desarrolla. Esta divulgación ayuda a la sociedad a comprender mejor la importancia de la investigación científica y las posibles aplicaciones de la tecnología para abordar los desafíos energéticos y ambientales.

En resumen, la divulgación científica es un componente vital del trabajo del CIEMAT, ya que facilita la transferencia de conocimiento de la comunidad científica al público y fomenta una mayor apreciación de la relación entre ciencia, tecnología y bienestar social.

Yolanda Benito Moreno

Directora General del CIEMAT

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

Marcos Lafoz Pastor

LOS ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS APLICADOS A LA ENERGÍA OCEÁNICA, AL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA Y A LA MOVILIDAD

Jorge Nájera Álvarez

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE MATERIALES METÁLICOS IRRADIADOS

Silvia Guerra Rodríguez

ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Óscar Durán Lucas

APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Marta Ibáñez Moragues

COMPATIBILIDAD DE MATERIALES ESTRUCTURALES CON EL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

Jesús Carreras Molina

AUTORES

INTRODUCCIÓN

MARCOS LAFOZ PASTOR

marcos.lafoz@ciemat.es

ADOPTA CIENCIA es una iniciativa con la que los investigadores del CIEMAT queremos dar a conocer, tanto internamente en nuestro centro de investigación como externamente, las actividades en las que se trabaja y cómo estas dan solución a los retos que plantea continuamente nuestra sociedad. Soluciones a unos retos que buscan ayudarnos a conseguir una sociedad más avanzada, moderna, justa y sostenible. Se busca dar a conocer al entorno social que nos rodea la importancia y la repercusión que tiene nuestro trabajo de investigación, lo que para nosotros podría ser la definición de divulgar. Y esta divulgación es una labor que debe recaer en los propios investigadores, como parte de su trabajo, como una responsabilidad y no una mera actividad relegada a los espacios de tiempo menos ocupados. El CIEMAT ya ha demostrado su compromiso con la divulgación científica y son muchas las iniciativas relacionadas con este concepto. ADOPTA CIENCIA es una de ellas.

En concreto, ADOPTA CIENCIA III: TECNOLOGÍA, IMPULSO SOCIAL, la actividad que se ha presentado este año, ha perseguido varios objetivos. Por un lado, identificar la relación que hay entre los desarrollos tecnológicos y científicos que se llevan a cabo en el CIEMAT y las aplicaciones que nos encontramos en nuestro día a día. Por otro lado, ayudar a que se conozca y se valore el trabajo de nuestros investigadores. Un esfuerzo entendido como una cadena de valor formada por la colaboración entre distintos grupos, con el apoyo de personal técnico y de administración propios y además la participación de otras instituciones, tanto públicas como privadas, y tanto a nivel nacional como internacional. En definitiva, el trabajo conjunto de una gran cantidad de profesionales involucrados en un compromiso que hacen posible obtener un resultado final exitoso que consiste en acercar la ciencia y la tecnología a la sociedad. Por último, ADOPTA CIENCIA tiene el objetivo de despertar o potenciar las vocaciones y el interés por el mundo científico y tecnológico entre gente muy joven, como muchas de las personas que han asistido a la jornada divulgativa, y que están empezando a tomar decisiones sobre su futuro profesional.

En esta tercera edición de ADOPTA CIENCIA hemos querido centrar la temática en cómo la ciencia y la tecnología van de la mano, tal y como muestra nuestro cartel, en busca de solucionar algunos de los retos de nuestra sociedad. La ciencia proporciona el conocimiento y las bases teóricas para el desarrollo de la tecnología, y la tecnología es la que permite impulsar nuevos descubrimientos y avances científicos que antes no eran posibles. Por tanto, son dos conceptos que se complementan y que además también se unen a la demanda que continuamente se solicita desde la sociedad. Todo ello permite lograr avances y mejoras en todos los ámbitos de nuestra vida, generando a la vez nuevos retos, con lo que el conocimiento sigue avanzando como una espiral infinita. Así, tecnología, ciencia y sociedad constituyen una terna de elementos perfectamente enlazados entre sí y en continua comunicación, dando lugar a lo que hemos venido a denominar IMPULSO SOCIAL, lema que en esta edición hemos considerado para la actividad.

ADOPTA CIENCIA III nos ha llevado a ver cómo la tecnología es capaz de impulsar muchos de los aspectos que ayudan a nuestra sociedad. Este viaje lo hemos recorrido de la mano de los principales protagonistas de esta actividad, cinco investigadores del Departamento de Tecnología del CIEMAT que han mostrado a los asistentes a la jornada presentaciones, prototipos, muestras, fotografías, etc., todos ellos relacionados con los desarrollos en los que trabajan los grupos de investigación a los que están asociados, así como cuáles son las aplicaciones donde se pueden utilizar.

En la edición de este año hemos contado con la participación de la Unidad de Sistemas Eléctricos de Potencia, Jorge Nájera Álvarez nos han mostrado cómo se puede desarrollar tecnología para obtener energía a partir de energías renovables marinas, porque es importante el almacenamiento de energía para nuestras redes eléctricas y cómo está siendo la transición en el transporte hacia medios más sostenibles como son los coches eléctricos.

Desde la Unidad de Caracterización Microestructural y Microanálisis, Silvia Guerra Rodríguez y Jesús Carreras Molina nos han hablado del desarrollo y caracterización de materiales para mejorar distintas tecnologías de generación de energía, las cuales precisan de condiciones de operación especiales, como, por ejemplo, dispositivos nucleares de fisión y fusión, energía solar térmica, pilas de combustible e hidrógeno (uno de los vectores energéticos más importantes que tendremos en un futuro).

Desde la Unidad de Aplicaciones Médicas, con Marta Ibáñez Moragues, y de la Unidad de Aceleradores de Partículas, con Óscar Durán Lucas, quienes han hablado del uso de radioisótopos en medicina, de técnicas como la protonterapia, o del uso de ciclotrones para la fabricación de radiofármacos. Además, se ha explicado la contribución a grandes instalaciones para física de partículas y cuál es el retorno a la sociedad.

Esta publicación presenta cinco artículos en los que los investigadores del CIEMAT desarrollan algunas ideas sobre el trabajo que están realizando en sus grupos de investigación, así como cuáles son las aplicaciones de los mismos a los retos de la sociedad. El artículo que presenta Jorge describe la utilización de los accionamientos eléctricos en la generación y almacenamiento de energía y en la movilidad. Por su parte, el artículo desarrollado por Silvia nos introduce las técnicas de caracterización de materiales metálicos irradiados y nos enseña a interpretar los resultados obtenidos. Óscar nos presenta un artículo en el que describe las principales aplicaciones en que se pueden utilizar los aceleradores de partículas. El artículo que ha preparado Marta nos muestra las principales aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes. Y finalmente, Jesús nos describe en su artículo la compatibilidad de materiales estructurales con el almacenamiento y transporte de hidrógeno.

LOS ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS APLICADOS A LA ENERGÍA OCEÁNICA, AL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA Y A LA MOVILIDAD

JORGE NÁJERA ÁLVAREZ

Jorge.Najera@ciemmat.es

RESUMEN

Los accionamientos eléctricos son sistemas capaces de convertir la energía eléctrica en mecánica, o viceversa, para distintas aplicaciones. Un accionamiento eléctrico está formado básicamente por: una máquina eléctrica, un sistema de adaptación mecánica, electrónica de potencia y un sistema de control que gobierna el sistema. Desde la [Unidad de Sistemas Eléctricos de Potencia](#) (uSEP) se presentan distintos proyectos desarrollados en el ámbito de los accionamientos eléctricos, aplicados a tres sectores diferentes: la generación de energía, y en concreto la generación eléctrica a partir de recursos disponibles en los océanos, el almacenamiento de energía, y la movilidad. En cada una de estos tres sectores se ha participado en proyectos en colaboración con la industria donde se ha investigado en nuevas tecnologías mediante el desarrollo de prototipos a distinta escala. En el caso de las energías oceánicas, se ha trabajado en el sistema de extracción de potencia (PTO), así como en el estudio de la problemática de integración en las redes eléctricas de este tipo de sistemas. En la aplicación de almacenamiento de energía se describen los avances realizados en las tecnologías de volantes de inercia que se han desarrollado en el CIEMAT en los últimos años, así como en el desarrollo de almacenamiento híbrido para favorecer el aumento de entrada de energías renovables en la matriz energética. Por último, en relación con la movilidad, se destacan los desarrollos realizados en el estudio de pérdida de capacidad en baterías de vehículos eléctricos y en el diseño y análisis del sistema de aceleración para sistemas de transporte ultrarrápido de tipo Hyperloop.

INTRODUCCIÓN: ¿QUÉ ES UN ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO Y PARA QUÉ SIRVE?

Los accionamientos eléctricos pueden definirse como aquellos sistemas capaces de convertir la energía eléctrica en mecánica (modo motor) o viceversa (modo generador) [1], siendo aplicables a procesos que van desde cadenas de producción industriales hasta aplicaciones domésticas, pasando por el transporte de bienes y personas, robótica y automática, almacenamiento de energía y generación de energía, entre otras muchas aplicaciones. Un accionamiento eléctrico está compuesto normalmente por: una máquina eléctrica, que puede funcionar como motor o generador, dependiendo de la aplicación, un sistema de adaptación mecánica a la aplicación, un subsistema electrónico de potencia con el que se acondicionan las señales de potencia desde la fuente de suministro o vertido de energía hasta la máquina eléctrica.

Sin embargo, también se pueden considerar como accionamientos eléctricos, con una perspectiva más amplia, sistemas como un conjunto de baterías conectadas a la red, ya que, aunque no incluyen una máquina eléctrica, comparten muchos de los elementos y la funcionalidad de los accionamientos eléctricos clásicos.

La uSEP desarrolla accionamientos eléctricos y centra su actividad en tres aplicaciones principales: energía oceánica, sistemas de almacenamiento de energía y movilidad. Como consecuencia de la actividad en estas tres áreas, los investigadores de la uSEP tienen una considerable producción científica en forma de artículos en revistas científicas del JCR (*Journal Citation Report*) o con alto impacto en cuanto al número de lecturas o visitas, así como en congresos y simposios internacionales.

APLICACIONES EN ENERGÍA OCEÁNICA

La energía oceánica es una fuente renovable de energía que aprovecha el movimiento de las olas, mareas, salinidad y gradientes térmicos del océano [2]. Dentro de esta temática, la uSEP centra su actividad en la energía undimotriz, que hace uso del movimiento de las olas para generar electricidad. De manera específica, y enmarcado en los accionamientos eléctricos para sistemas de generación de energía undimotriz, la uSEP trabaja en el desarrollo del sistema de extracción de potencia (PTO), que se define como el sistema que convierte la energía absorbida por el convertidor primario en energía eléctrica. El convertidor primario puede ser, a modo de ejemplo, una cámara cerrada para una columna de agua oscilante o una boya que responde al movimiento oscilatorio de las olas. El PTO tiene gran importancia tanto en la eficiencia con la que la energía de las olas absorbida se convierte en energía eléctrica, como en la masa, arquitectura y la dinámica estructural del sistema completo (convertidor primario, PTO y sistema de amarre) [3].

Hay 3 ámbitos concretos de actuación en los que se centran los desarrollos de la uSEP:

- Desarrollo de PTO modulares.
- Desarrollo de estrategias de control para integración en red.
- Instalaciones de ensayo singulares con sistemas Hardware-In-the-Loop (HIL).

A continuación, se describirán algunos proyectos desarrollados por la uSEP en los anteriores ámbitos de actuación:

FUNCIONALIDAD DE SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA UNDIMOTRIZ (PROYECTO UNDIGEN)

El proyecto UNDIGEN (Funcionalidad de Sistemas de Generación Eléctrica Undimotriz) se configuró como un proyecto de demostración en alta mar (ubicado a 1 milla náutica de la costa noreste de Gran Canaria) de un innovador sistema de generación eléctrico de energía de las olas desarrollado en España por la empresa Wegde Global S.A.

El objetivo principal consistió en mejorar el rendimiento y fiabilidad en un entorno real (PLOCAN, Gran Canaria) de un convertidor de energía de las olas que integra un novedoso sistema de generación lineal de 200 kW de potencia, como paso previo al lanzamiento de una planta piloto de generación undimotriz.



Figura 1. Pruebas en seco del PTO en el laboratorio de sistemas de potencia.

La uSEP estuvo involucrado en todas las tareas del proyecto, con especial dedicación a las pruebas en seco de control y validación del PTO (Figura 1), puesta en marcha (Figura 2) y pruebas de operación y funcionamiento en ambiente real del dispositivo completo (Figura 3).



Figura 2. Puesta en marcha del dispositivo de UNDIGEN.



Figura 3. Pruebas en ambiente real del dispositivo de UNDIGEN.

SURGING ENERGY ABSORPTION THROUGH INCREASING THRUST AND EFFICIENCY (PROYECTO SEA-TITAN)

El [proyecto SEA-TITAN](#) (*Surging Energy Absorption Through Increasing Thrust and Efficiency*) se planteó como un proyecto para diseñar, construir, ensayar y validar un PTO modular que pudiese ser utilizado en diversos tipos de convertidores de energía undimotriz. En este sentido, el objetivo principal fue incrementar el rendimiento y la densidad de fuerza, a la vez que se disminuía el coste, de un PTO basado en una novedosa configuración y geometría y aplicarlo en convertidores de diferentes fabricantes.



Figura 4. Bobinas de la parte móvil (activa) del PTO de SEA-TITAN.

La uSEP estuvo involucrada en todos los paquetes de trabajo del proyecto, tanto en tareas de diseño del PTO como de fabricación (Figura 4) y ensayo y validación del PTO en el laboratorio de sistemas de potencia (Figura 5).



Figura 5. PTO de SEA-TITAN durante las pruebas en el laboratorio de sistemas de potencia.

APLICACIONES EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Los sistemas de almacenamiento de energía se definen como aquellos métodos o soluciones tecnológicas, generalmente sujetos a un control independiente, con los que es posible almacenar la energía generada por un sistema, mantenerla acumulada y usarla cuando sea necesario [5]. Dentro de los sistemas de almacenamiento de energía, la uSEP centra su actividad en los sistemas que suministran energía eléctrica durante su descarga, y dentro de ellos en baterías de ion-litio, supercondensadores y volantes de inercia.

Este tipo de sistemas de almacenamiento necesitan sistemas electrónicos de potencia para controlar la carga y la descarga, de manera que el control que se programe en dichos sistemas electrónicos responda a las necesidades de la aplicación en la que se está instalando el almacenador de energía.

Dado que los sistemas de almacenamiento tienen diferentes características de potencia, energía, tiempo de respuesta, vida útil, etc. es frecuente encontrar aplicaciones cuyas necesidades de almacenamiento han de satisfacerse no con uno, sino con dos o más sistemas de almacenamiento actuando conjuntamente y con una operación coordinada, dando lugar a los sistemas híbridos de almacenamiento de energía [5].

A continuación, se describirán algunos proyectos desarrollados por la uSEP en los anteriores ámbitos de actuación.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO AVANZADO DE ENERGÍA (PROYECTO SA2VE)

El proyecto SA2VE (Desarrollo de un Sistema de Almacenamiento Avanzado de Energía) se configuró para desarrollar una tecnología de almacenamiento de energía cinética que posteriormente pudiese ser aplicada a tres sectores: aplicaciones estacionarias de transporte ferroviario, gestión de la energía de la edificación y a la calidad del suministro eléctrico. La uSEP estuvo involucrado en casi todas las fases del proyecto, destacando el diseño, desarrollo y pruebas de funcionamiento de volantes de inercia (Figura 6), e incluyendo el diseño y control de los convertidores electrónicos correspondientes.



Figura 6. Volante de inercia durante las pruebas en el laboratorio de sistemas de potencia.

SISTEMA HÍBRIDO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN (PROYECTO SH²)

El proyecto SH² (Sistema Híbrido de Almacenamiento de Energía para Sistemas Híbridos de Generación), en colaboración con GAMESA Electric S.A. y la Universidad de Alcalá de Henares, se definió con el objetivo de desarrollar un sistema híbrido de almacenamiento basado en baterías y supercondensadores para poder ser utilizado en sistemas de generación renovable híbridos, conectados a redes aisladas o débiles. En este sentido, los objetivos específicos incluían el desarrollo del sistema de almacenamiento basado en supercondensadores que pudiera dar soporte a un conjunto de baterías para aumentar el ciclo de vida de las mismas retardando lo máximo posible su pérdida de capacidad por ciclado. Además, se desarrolló el control de planta de los convertidores electrónicos para coordinar la operación conjunta de los elementos. La uSEP estuvo dedicada al diseño, montaje y caracterización del sistema de supercondensadores, y a la integración de los algoritmos de control en los convertidores (Figura 7).



Figura 7. Convertidores electrónicos y supercondensadores durante los ensayos en el laboratorio de sistemas de potencia.

STORAGE RESEARCH INFRASTRUCTURE ECO-SYSTEM (PROYECTO STORIES)

El [proyecto StoRIES](#) (*Storage Research Infrastructure Eco-System*), en activo al momento de escribir este artículo, agrupa a 16 socios, 31 beneficiarios y 58 instalaciones singulares relacionadas con el almacenamiento de energía, con el objetivo de promover la investigación y el desarrollo de la industria energética, y buscar soluciones innovadoras para el almacenamiento de energía sostenible en Europa. El foco principal está puesto sobre los sistemas híbridos de almacenamiento de energía, incluyendo sistemas térmicos y eléctricos. Dentro de este proyecto, la uSEP está dedicado al

desarrollo de la herramienta de dimensionado y análisis tecno-económico de sistemas industriales con almacenamiento híbrido, así como a la definición y redacción de documentos de referencia para evaluar el comportamiento de diferentes configuraciones de sistemas híbridos según la aplicación.



Figura 8. Consorcio del proyecto StoRIES.



Figura 9. Investigadores de StoRIES durante una reunión general del proyecto.

APLICACIONES EN MOVILIDAD Y TRANSPORTE

El ecosistema de movilidad eléctrica es aquel formado por vehículos que incorporan un motor eléctrico para su propulsión, así como los elementos complementarios para su correcto funcionamiento. Dentro de este ámbito, la uSEP enmarca, por un lado, sus investigaciones en los sistemas de almacenamiento ligados a movilidad eléctrica urbana, incluyendo las infraestructuras de carga. Por otro lado, también desarrolla sistemas de tracción y aceleración para vehículos “ultrarrápidos” tipo Hyperloop.

Por el lado de los vehículos eléctricos, los elementos críticos y cuellos de botella siguen siendo las baterías a bordo y su envejecimiento asociado (pérdida de capacidad) y la escasez de estaciones de carga rápida en entorno urbano, además del coste del vehículo.

En relación a los trenes ultrarrápidos, se están haciendo importantes esfuerzos por aumentar la confiabilidad, robustez y seguridad de la tecnología hasta llegar a la etapa comercial.

Dentro de la temática movilidad & transporte, la uSEP trabaja en las siguientes líneas:

- Estudios de envejecimiento de baterías de ion-litio ligadas a transporte eléctrico.
- Planificación, dimensionado y control de estaciones de carga rápida.
- Diseño y desarrollo de accionamientos eléctricos para trenes tipo Hyperloop.

A continuación, se describirán algunos proyectos desarrollados por la uSEP en los anteriores ámbitos de actuación.

GESTIÓN INTELIGENTE DE LA ENERGÍA REGENERADA EN LÍNEAS METROPOLITANAS PARA LA CARGA DE COCHES ELÉCTRICOS (PROYECTO TRAIN2CAR)

El proyecto TRAIN2CAR (Gestión Inteligente de la Energía Regenerada en Líneas Metropolitanas para la Carga de Coches Eléctricos) se planteó con el objetivo de desarrollar un innovador sistema de gestión inteligente de la carga rápida de coches eléctricos a partir de la catenaria de Metro de Madrid, teniendo en cuenta el tráfico y consumo de los trenes y la utilización de un sistema de almacenamiento de energía basado en supercondensadores. De esta manera, el desarrollo de estrategias optimizadas de operación maximizaba el aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes en los frenados y la eficiencia global del sistema. Dentro de este proyecto, la uSEP estuvo a cargo de la implementación de las estrategias de control de energía, el montaje de los supercondensadores y de la implementación de los ensayos de laboratorio.

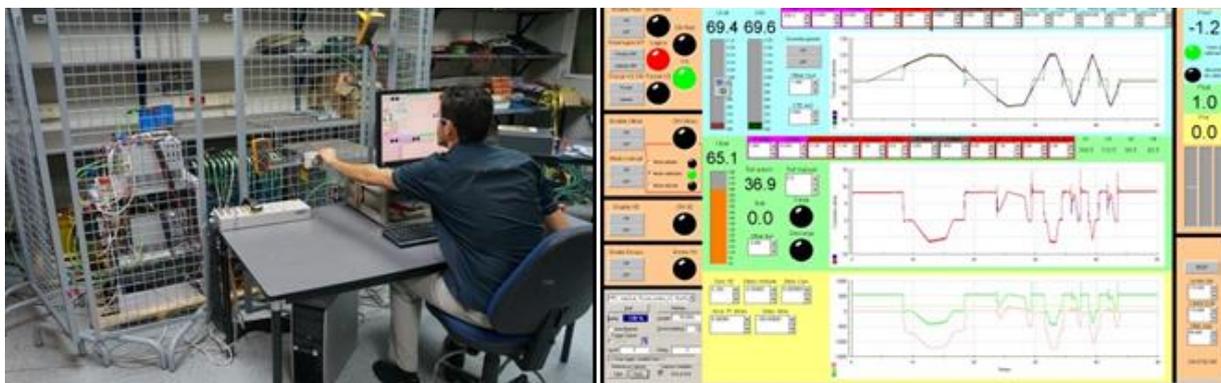


Figura 10. Desarrollo del sistema de control para el proyecto TRAIN2CAR.



Figura 11. Inauguración de la estación de carga de vehículo eléctrico del proyecto TRAIN2CAR.

SWITCHED RELUCTANCE LINEAR MOTOR FOR ELECTRIC ULTRA-HIGH-SPEED (PROYECTO SCALE-HYPERLOOP)

El proyecto [SCALE](#) (*SwitChed reluctAnce Linear motor for Electric ultra-high-speed*), en activo a fecha de escritura de este artículo, enlaza con una serie de contratos de prestación de servicios previos para la empresa [Zeleros Global SL](#) que tienen como objetivo final disponer de un prototipo y demostrador de un sistema de aceleración para vehículos ultrarrápido tipo Hyperloop en las instalaciones de Zeleros. Hasta llegar a ese hito, han de completarse los desarrollos y validación de

todos los sistemas que van a formar parte de la instalación, desde la cápsula, el sistema de levitación, los tramos de aceleración y frenado, sistema de propulsión a bordo, sistema de vacío, etc. La uSEP está a cargo del diseño, desarrollo y puesta en marcha del sistema de aceleración y frenado de la cápsula (Figura 12), incluyendo el control y comunicación.

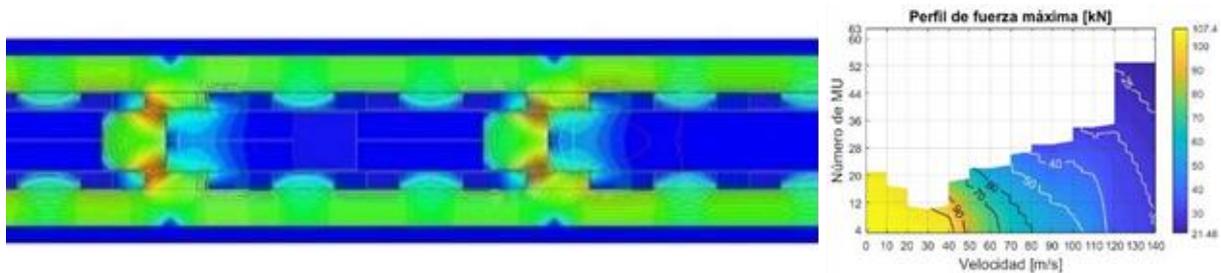


Figura 12. Resultados del diseño hecho mediante herramientas de cálculo por elementos finitos (FEM) de la máquina lineal para la aceleración de las cápsulas del sistema Hyperloop.

REFERENCIAS

- [1] I. Boldea and S. A. Nasar. Electric drives. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2016.
- [2] A. Samad, S. A. Sannasiraj, V. Sundar, and P. Halder. Ocean Wave Energy Systems: Hydrodynamics, power takeoff and control systems. Cham, Switzerland: Springer, 2022.
- [3] A. Pecher and J. P. Kofoed, Handbook of Ocean Wave Energy. Cham, Switzerland: Springer Open, 2017.
- [4] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraouli, Energy storage: Applications and challenges. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 120, pp. 59–80, 2014.
- [5] S. Hajiaghasi, A. Salemnia, and M. Hamzeh, “Hybrid energy storage system for Microgrids Applications: A Review”. Journal of Energy Storage, vol. 21, pp. 543–570, 2019.

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE MATERIALES METÁLICOS IRRADIADOS

SILVIA GUERRA RODRÍGUEZ

siguerra@ucm.es

RESUMEN

Cuando un material sometido a esfuerzos mecánicos o térmicos es irradiado, se pueden producir cambios microestructurales que pueden dar lugar a comportamientos no deseados. Este artículo presenta las características que deben tener los materiales expuestos a altos índices de radiación en entornos nucleares. La red cristalina que constituye la estructura de un material metálico debería ser idealmente perfecta pero puede ser modificada, entre otras causas, por el efecto de radiaciones externas. El texto analiza los tipos de defectos más importantes y las consecuencias que pueden originar, como son la deformación del material, su fragilización, la pérdida de ductilidad o la activación del mismo. Asimismo, el artículo se centra en las técnicas de microscopía más utilizadas para la detección de estos defectos, explicando el principio de funcionamiento de los dispositivos utilizados, ventajas e inconvenientes, tanto en el caso de la microscopía óptica como de la electrónica. Dentro de la microscopía electrónica se presta especial atención a las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM).

INTRODUCCIÓN

La caracterización de materiales metálicos irradiados desempeña un papel fundamental en el estudio de los efectos de la radiación en la microestructura y las propiedades de estos materiales.

En el ámbito de la industria nuclear, es crucial comprender los efectos de la radiación en los materiales estructurales. Estos materiales se encuentran expuestos a la radiación con partículas de alta energía, que cuando alcanzan el material, le transfieren su energía, dando lugar a una serie de interacciones que pueden generar cambios significativos en la microestructura. Estos cambios pueden tener un impacto considerable en las propiedades físicas del material, ya que pueden afectar a su rendimiento y su integridad estructural a largo plazo, lo cual puede llevar al fallo del material.

Por esta razón es esencial llevar a cabo una caracterización detallada de estos materiales y los posibles defectos que se generan como consecuencia de la irradiación con partículas de alta energía, ya que estudiar y comprender la naturaleza de estos defectos tiene gran importancia para evaluar y predecir el comportamiento de los materiales expuestos a la radiación en entornos nucleares.

Esta caracterización exhaustiva permite obtener información sobre los cambios microestructurales que se producen cuando un material es irradiado; y este conocimiento contribuye a mejorar la comprensión de los procesos que ocurren en estos materiales en la escala nanométrica, que pueden llegar a producir cambios macroscópicos e incluso llevar al fallo del material.

Para hablar de la caracterización de materiales metálicos irradiados, existen tres aspectos fundamentales que es necesario comprender previamente: la estructura de materiales, que nos

permite conocer su composición y organización a nivel atómico, las técnicas de caracterización microestructural más empleadas para estudiar los materiales estructurales y finalmente el tipo de daño que produce la irradiación en la microestructura para comprender cómo afecta esta a las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

ESTRUCTURA DE MATERIALES

Todas las propiedades físicas y químicas de un material como la densidad, la dureza, la conductividad térmica o el comportamiento frente a la deformación están determinadas por su estructura, es decir, la forma en la que sus átomos están ordenados en el espacio. Dependiendo de esta organización, los materiales se pueden clasificar en dos categorías principales: amorfos y cristalinos [1].

Los materiales amorfos no siguen un patrón específico en su estructura, y sus átomos están dispuestos de manera aleatoria en el espacio, lo que permite que sus propiedades sean uniformes en todas las direcciones. Ejemplos de materiales amorfos incluyen el vidrio y polímeros como el poliestireno (PS) o el polimetilmetacrilato (PMMA).

Por otro lado, los materiales cristalinos se caracterizan por una estructura atómica altamente ordenada. Los átomos que la conforman están dispuestos en un patrón repetitivo en las tres dimensiones del espacio. Esto significa que tienen planos de red y direcciones cristalográficas bien definidos, lo cual hace que sus propiedades puedan variar en función de la dirección en la que se midan. Ejemplo de materiales cristalinos son los metales, como el hierro o el aluminio, o los minerales como el cuarzo o el diamante.

La unidad básica de la estructura cristalina se conoce como celda unitaria, y atendiendo a la forma y las dimensiones de esta celda unitaria se pueden distinguir hasta 14 tipos de redes cristalinas diferentes, clasificadas en 7 tipos de sistemas, como se muestra en la Figura 1 [2][3].

La mayoría de los materiales metálicos cristalizan en tres de las redes más compactas:

- Estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC): Los átomos se sitúan en los vértices del cubo y uno adicional en el centro del cubo. Ejemplos de materiales con esta estructura son el cromo y el hierro.
- Estructura cúbica centrada en las caras (FCC): recibe este nombre porque en esta estructura los átomos se encuentran en los vértices del cubo y en cada una de las caras. Materiales que siguen esta estructura son el aluminio y el cobre.
- Estructura hexagonal compacta (HCP): En esta estructura, los átomos se encuentran en los vértices de un prisma de base hexagonal, y el centro de esos hexágonos. Ejemplos de materiales con sus átomos dispuestos en hexagonal son el magnesio o el zinc.

La red cristalina de un material idealmente debería ser perfecta, pero en la práctica existen defectos que interrumpen o alteran el ordenamiento regular de los átomos en el espacio [5]. Estos defectos pueden ser inherentes al material, y producirse durante la formación del cristal, o pueden aparecer

debido a condiciones externas, como una fuerza mecánica o la radiación con partículas. Se clasifican, en cuanto a su tamaño, en tres categorías: defectos puntuales, defectos lineales y defectos planares.

Los defectos puntuales son discontinuidades de la red cristalina que involucran uno o varios átomos y provocan distorsiones en la red. Existen varios tipos de defectos puntuales:

- Huecos o vacantes: se producen cuando un átomo no se encuentra en su lugar normal en la red. Se forman principalmente a elevadas temperaturas o debido a la radiación.
- Intersticiales: estos defectos se producen cuando un átomo adicional ocupa un espacio vacío dentro de la red cristalina. Estos átomos intersticiales son más pequeños que los átomos que forman la red del material, pero son más grandes que los lugares intersticiales que ocupan, lo que causa distorsiones en la red cristalina.
- Sustitucionales: este tipo de defectos se genera cuando un átomo de la red cristalina es reemplazado por otro átomo distinto. Este átomo puede ser de un tamaño mayor o menor que el átomo original al que reemplaza lo que puede crear distorsiones en la red.

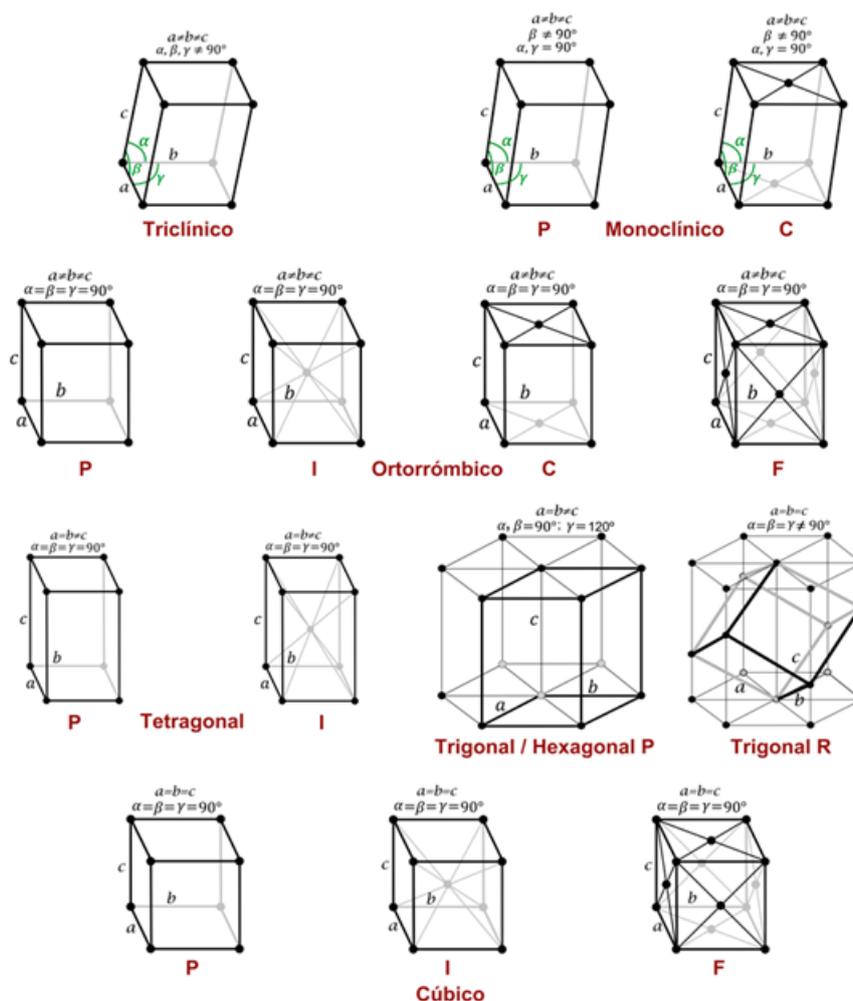


Figura 1. Esquema de los diferentes tipos de redes en que se organizan los átomos en los materiales cristalinos [4].

En la Figura 2 se puede observar ejemplos de estos tres tipos de defectos en la red cristalina.

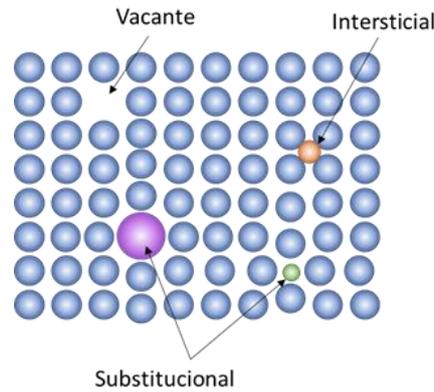


Figura 2. Esquema de los diferentes tipos de defectos puntuales.

Los defectos lineales son defectos que aparecen cuando hay una distorsión de la red cristalina a lo largo de una línea. El principal tipo de defectos lineales son las dislocaciones, que pueden ser el resultado de desalineamientos en la estructura, de errores en el apilamiento de planos atómicos o imperfecciones durante el crecimiento del cristal. Las dislocaciones juegan un papel fundamental en el comportamiento mecánico de los materiales, ya que, al aplicar una tensión al material, las dislocaciones pueden moverse, lo cual permite que los átomos se reorganicen y que el material pueda deformarse plásticamente sin llegar a romperse.

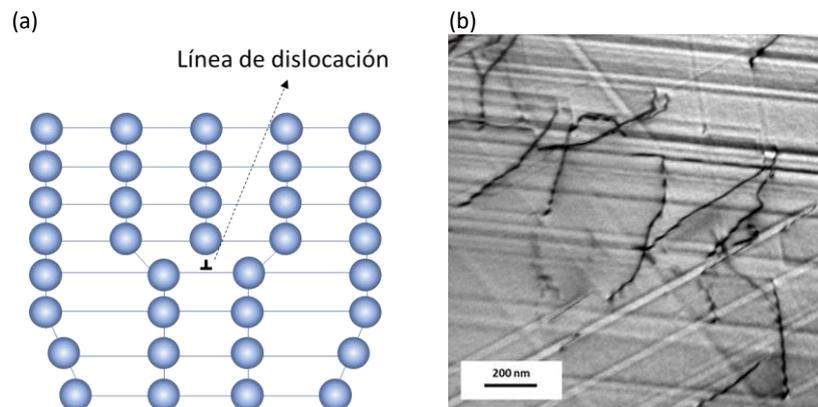


Figura 3. (a) Esquema de cómo son las dislocaciones a nivel atómico y (b) cómo se visualizan las dislocaciones en un material empleando microscopía electrónica de transmisión.

En la Figura 3.a se puede observar el esquema de las dislocaciones en la red atómica, y en la Figura 3.b, se presenta una imagen tomada con microscopía electrónica de transmisión de un acero inoxidable deformado. En la imagen se ve en gris la matriz del material, y se pueden observar líneas oscuras que representan las dislocaciones, es decir, zonas de la estructura cristalina que han sido alteradas debido a la deformación. También es posible apreciar las trazas que dejan las dislocaciones a medida que se deslizan por el material bajo la influencia de las tensiones mecánicas aplicadas, que se observan en forma de líneas rectas que enmarcan las dislocaciones y son una representación visual de los caminos seguidos por las dislocaciones al moverse por la estructura deformada.

Los defectos planares son un tipo de defectos en la estructura cristalina que involucran todo un plano atómico, que no está alineado con los demás, o que no existe. Ejemplos de este tipo de defectos son:

- Los bordes de grano frontera. Separan dos granos contiguos con orientaciones cristalográficas distintas.
- Las maclas. Son defectos que separan dos regiones del material con direcciones cristalográficas especulares la una de la otra
- La falla de apilamiento. Ocurre cuando hay una interrupción en la secuencia de apilamiento de los planos atómicos dentro de la estructura cristalina.

En la Figura 4.a se presenta de forma esquemática la interrupción de la secuencia de apilamiento de los planos, es decir, una falla de apilamiento, en comparación con la secuencia correcta. En la Figura 4.b se presenta una imagen tomada con microscopía de transmisión en un acero inoxidable en estado de recepción, sin haber sido deformado. En la figura se puede observar un borde de grano, es decir, una región que separa dos zonas contiguas con orientaciones cristalinas diferentes. También se pueden observar algunas dislocaciones en forma de líneas discontinuas, y varias fallas de apilamiento, que se pueden observar como franjas de rayas blancas y negras, que indican las zonas donde los planos atómicos no están perfectamente colocados.

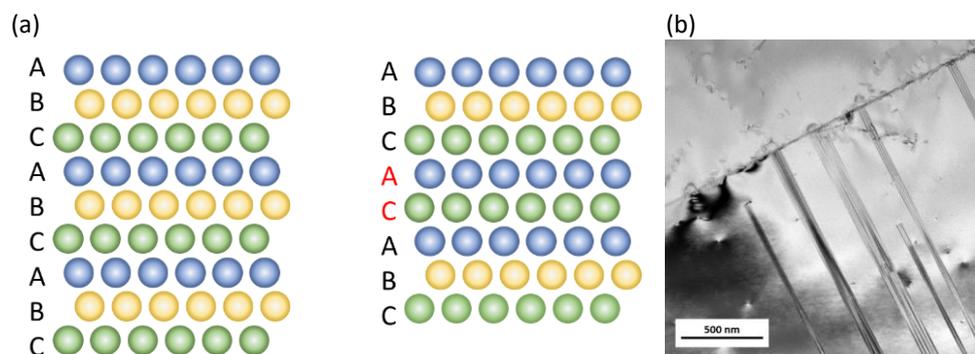


Figura 4. Ejemplo de fallas de apilamiento: (a) diseño esquemático de una falla de apilamiento y (b) fallas de apilamiento y bordes de granos visualizados con microscopía electrónica de transmisión.

Estos defectos pueden tener consecuencias significativas en las propiedades de los materiales, por lo que el estudio y la comprensión de los defectos de la red cristalina de un material es esencial para controlar su comportamiento, y tanto la estructura cristalina de un material como sus defectos pueden determinarse empleando técnicas microscópicas adecuadas de caracterización de materiales.

TÉCNICAS DE MICROSCOPIA

Entre las diversas técnicas de caracterización empleadas, las técnicas de microscopía son especialmente efectivas para este propósito ya que permiten examinar la estructura interna de los materiales como la orientación de cada uno de los granos que lo conforman y los defectos que contiene. En el caso de los materiales metálicos, se emplean principalmente la microscopía óptica y las microscopías electrónicas de barrido y de transmisión, teniendo esta última especial importancia en el estudio microestructural de los materiales irradiados.

MICROSCOPIA ÓPTICA

El microscopio óptico es una herramienta fundamental en la caracterización metalográfica de los materiales, y es el tipo más común de microscopio que se encuentra en la actualidad. Está compuesto por una serie de componentes que nos permiten observar objetos de manera ampliada. En primer lugar, están los oculares, que son las lentes situadas en la parte superior del microscopio, por donde se mira para ver la imagen ampliada. Estas lentes también amplían la imagen de las lentes objetivo, situadas en la parte inferior del microscopio, cerca de la muestra que se desea observar, y cuya función es recoger la luz que proviene de esta muestra y magnificar su imagen. También tiene un diafragma que permite regular la cantidad de luz que llega a la muestra, y un condensador, que es una lente situada abajo la muestra que permite enfocar y dirigir el haz de luz sobre la muestra. También hay una fuente de luz para iluminar el objeto a observar. Al observar un objeto con el microscopio óptico, la luz reflejada o transmitida por el objeto pasa a través del objetivo y a través del ocular, y podemos observar una imagen ampliada a través de este

Una de las ventajas del microscopio óptico es que nos permite observar una amplia variedad de muestras sin necesidad de una preparación previa minuciosa. Sin embargo, este microscopio tiene un límite de resolución de alrededor de 0,2 micras; y este límite está determinado por la longitud de onda de la luz visible que se utiliza para formar las imágenes, ya que, según las leyes de la física, ningún instrumento puede resolver detalles más pequeños que la longitud de onda empleada

Pese a esta limitación, el microscopio óptico es una herramienta esencial en la caracterización metalográfica de los materiales ya que permite obtener información sobre la estructura de materiales, la disposición de los granos en el material.

En la Figura 5.a se presenta un microscopio óptico y se indican sus componentes. En la Figura 5.b se presenta un ejemplo de la microestructura superficial de un acero inoxidable austenítico de tipo 316L, un material que se ha empleado tradicionalmente en distintos componentes del interior de un reactor nuclear, como el revestimiento de la vasija o los pernos que sujetan este revestimiento. Con este tipo de microscopio se puede observar su superficie, la forma de los granos que lo conforman e incluso distintas fases.

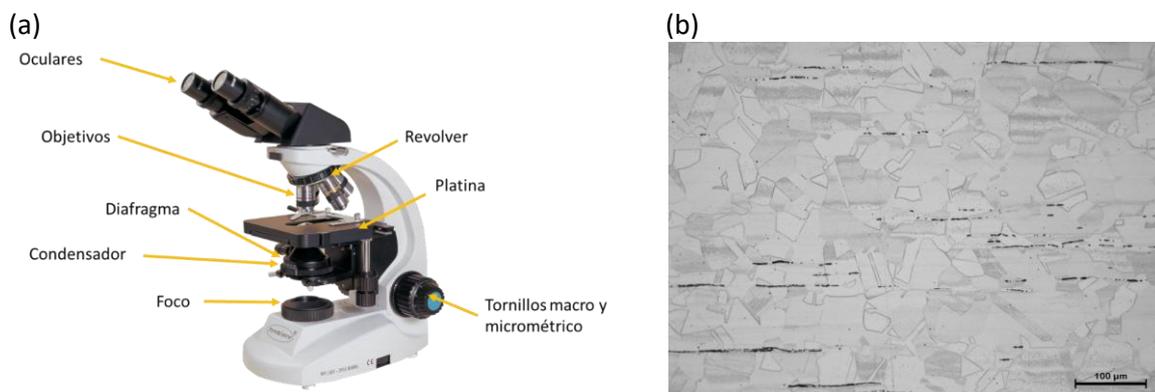


Figura 5. (a) Microscopio óptico y sus componentes. (b) Ejemplo de imagen de un acero inoxidable 16L con estructura cúbica centrada en las caras

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

La microscopía electrónica en lugar de luz visible emplea haces de electrones de alta energía, aprovechando el hecho de que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la longitud de onda de la luz visible y nos permite tener mayor resolución en las imágenes, y observar detalles en una escala mucho más pequeña que el microscopio óptico.[6]

En la Figura 6 se presenta de forma esquemática la interacción entre los electrones y los átomos de la materia que se investiga, y resume las señales que se producen por esta interacción.

Los electrones se emiten desde una fuente, y son acelerados hacia la muestra formando un haz. El haz de electrones llega a la muestra (haz incidente) e interactúa con los átomos de distintas capas, y puede dar lugar a los electrones retrodispersados, los electrones secundarios, o los rayos X característicos.

Cuando la muestra es suficientemente delgada, una pequeña fracción de electrones puede atravesarla formando el haz de electrones transmitido, que tiene la misma dirección y sentido que el haz de electrones incidente.

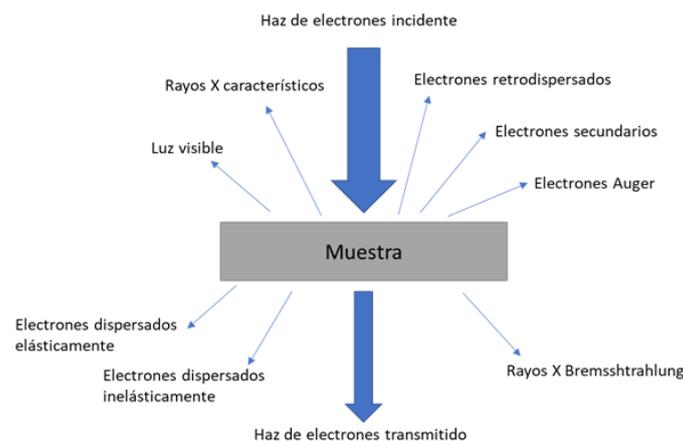


Figura 6. Esquema de las señales producidas cuando un haz de electrones interactúa con un material.

Existen dos tipos principales de microscopía electrónica, la microscopía electrónica de transmisión, que aprovecha los electrones que pasan a través de la muestra y la microscopía electrónica de barrido, que emplea las señales de electrones dispersados y secundarios para formar la imagen.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Un microscopio electrónico de barrido emplea un haz de electrones de alta energía que escanea la superficie de la muestra y nos permite obtener imágenes de alta resolución. Aprovecha principalmente las señales de electrones secundarios, retrodispersados y rayos X, por lo que se puede emplear esta herramienta para la caracterización de materiales, ya que puede proporcionar información sobre la estructura superficial, la composición y algunos defectos de gran tamaño [7].

Los microscopios electrónicos de barrido constan de un cañón de electrones de alta energía que genera un haz de electrones que se enfoca sobre la muestra empleando una serie de lentes

electromagnéticas, que funcionan de manera similar a las lentes ópticas en un microscopio óptico, pero en lugar de ser lentes cóncavas que enfocan la luz, son una serie de bobinas electromagnéticas y deflectores que permiten enfocar y dirigir el haz de electrones gracias a los campos magnéticos. El haz de electrones recorre la superficie de la muestra de manera controlada, cubriendo toda el área que estamos estudiando. Los electrones de este haz interactúan con los electrones de la muestra en cada punto estudiado y generan una serie de señales como los electrones secundarios, los retrodispersados o los rayos X, que son recopiladas mediante una serie de detectores adecuados a cada señal. Finalmente, estas señales se amplifican y se procesan para formar una imagen en un monitor, que es donde se visualiza la muestra.

Una de las técnicas que permite la microscopía electrónica de barrido es la difracción de electrones retrodispersados (EBSD), que es una herramienta que permite analizar las orientaciones cristalinas de los granos de las muestras gracias a los electrones retrodispersados [8].

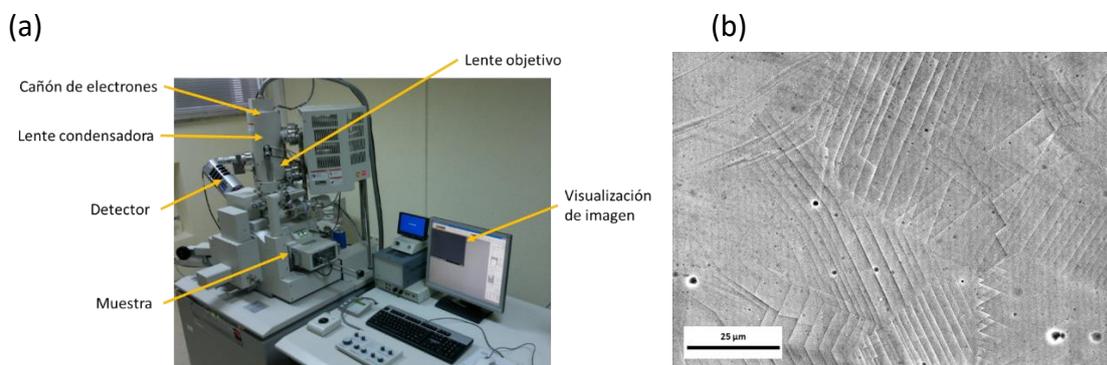


Figura 7. (a) Microscopio electrónico de barrido empleado en los estudios de la microestructura superficial (b) Ejemplo de imagen SEM de la superficie un acero inoxidable deformado.

La Figura 7.a muestra un microscopio electrónico de transmisión empleado para caracterizar materiales, y en la propia imagen se señalan los componentes más importantes de este microscopio.

La Figura 7.b muestra un ejemplo de la microestructura de un acero inoxidable austenítico tipo 316L deformado. En este caso se puede observar la imagen a mayores aumentos que con el microscopio óptico, y se pueden ver los bordes de grano y el efecto de la deformación en el material, que se presentan en forma de líneas rectas superficiales que aparecen de forma generalizada en cada uno de los granos que conforman el material.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (TEM)

Un microscopio electrónico de transmisión (TEM), emplea un fino haz de electrones acelerados con una energía tal que puede atravesar una muestra suficientemente delgada, y aprovecha las señales de los electrones transmitidos para formar la imagen que podemos observar. Con esta técnica se pueden analizar objetos en escala nanométrica y obtener imágenes de alta resolución.

Se puede entender el microscopio de transmisión como una columna en la que están ordenadas de manera adecuada una fuente de electrones, un sistema de lentes electromagnéticas y aperturas que permitan formar la imagen y el detector [9]. En la parte superior de esta columna se encuentra

la fuente de electrones, capaz de generar un haz coherente de electrones de alta energía que es acelerado por un voltaje hacia la parte inferior de la columna. Este haz pasa a través de las lentes condensadoras, compuestas por bobinas electromagnéticas que generan campos magnéticos que actúan sobre el haz de electrones y permite controlar el tamaño del haz y enfocarlos sobre la muestra. La muestra está situada en un portamuestras adecuado que permite inclinarla hasta 45° generalmente en dos ejes, para poder realizar un análisis cristalográfico adecuado. Cuando los electrones atraviesan la muestra, interactúan con los átomos que la forman y el haz sufre dispersiones elásticas e inelásticas que nos permiten obtener información sobre la muestra observada. Los electrones que atraviesan la muestra se focalizan en el plano focal posterior a la lente objetivo, que es la encargada de recoger los electrones enfocarlos con ayuda de campos electromagnéticos, actuando como una lente convergente en un microscopio óptico. Así, se forma en el primer plano imagen una imagen invertida, que los siguientes conjuntos de lentes (intermedias y proyectora) se encargan de magnificar y mejorar la calidad de la imagen, así como controlar la formación de los patrones de difracción.

Para visualizar la imagen creada se emplea una pantalla de fósforo al final de la columna que registra la cantidad de electrones que alcanzan cada punto del plano focal y convierte esta información en una imagen. Una alternativa a esta pantalla de fosforo es una cámara que nos permite capturar la imagen digitalmente y mostrarla en un monitor. Esta imagen se observa en una escala de blanco y negro, y el contraste dependerá de diversos factores como el espesor de la muestra, el número atómico del elemento que se está observando o los haces seleccionados para formar la imagen.[10]

En la Figura 8.a se presenta un microscopio electrónico de transmisión, con sus componentes más importantes señalados en la imagen. En la Figura 8.b se presenta un ejemplo de la microestructura estudiada por TEM de un acero inoxidable austenítico de tipo 316L sometido a deformación. Con esta técnica se pueden alcanzar mayores aumentos que con SEM y con óptico, y permite ver el interior del material. En esta imagen se pueden observar número elevado de dislocaciones con sus respectivas trazas.

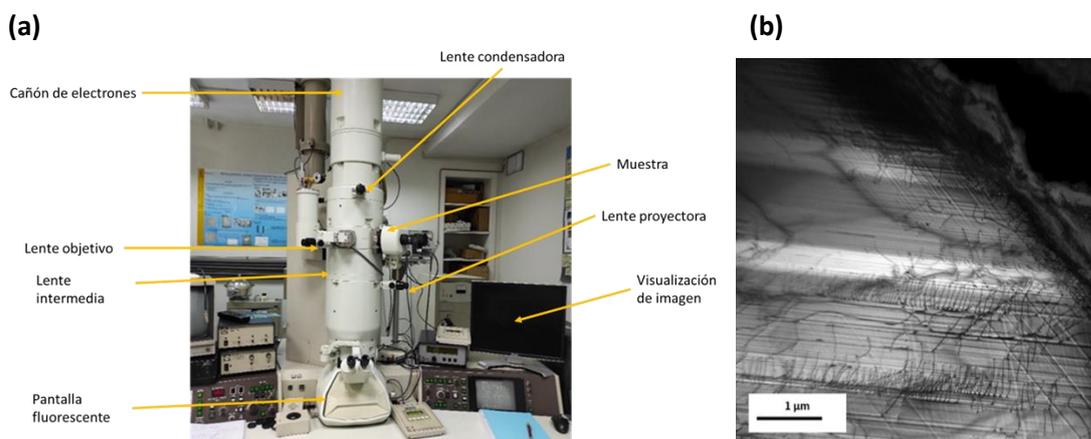


Figura 8. (a) Esquema de un microscopio electrónico de transmisión. (b) Ejemplo de imagen tomada con el microscopio de transmisión.

CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO POR IRRADIACIÓN CON PARTÍCULAS EN LA MICROESTRUCTURA DE MATERIALES

El daño por irradiación es uno de los mecanismos de degradación más importante que se da en los materiales nucleares; ya que los defectos microscópicos producidos por la irradiación pueden tener consecuencias en la escala macroscópica, incluyendo el hinchamiento del material, la fragilización, la pérdida de ductilidad o la activación del material, lo cual hace que el manejo de los materiales más complejo [11].

Los materiales que se emplean para construir reactores nucleares están expuestos durante largos periodos de tiempo a elevados niveles de radiación de alta energía. En un reactor, los neutrones procedentes de las reacciones de fisión del combustible nuclear, pueden alcanzar el material y transferirle su energía a los átomos que lo componen. Estos átomos con alta energía pueden “salir” de su posición original en la red cristalina y chocar con otros átomos, generando a su paso una serie de defectos puntuales como vacantes o intersticiales debidos a las distintas interacciones atómicas y conocida como “daño en cascada” [12].

En la actualidad es posible simular las condiciones a las que están sometidos los materiales del interior de un reactor exponiéndolos de forma controlada a distintas clases de partículas de alta energía, como neutrones, protones o iones, que permiten obtener microestructuras dañadas como las que se pueden encontrar en un reactor nuclear.

Los defectos puntuales que se producen cuando una partícula de alta energía es bombardeada hacia un material, pueden formar agregados, creando defectos de mayor tamaño que pueden ser de varios tipos incluyendo bucles de dislocación, precipitados, o cavidades. El tamaño, tipo, y densidad de defectos en el material depende del tipo de partícula empleado, la energía a la que es acelerada hacia el material, y la temperatura y dosis de irradiación. Todos estos defectos pueden dar lugar a una serie de consecuencias en el material, como son el endurecimiento por irradiación o la fragilización del material. Esto significa que los materiales se vuelven más duros y resistentes a la deformación plástica, ya que los defectos inducidos por la irradiación a la que han sido sometidos los materiales impiden el libre deslizamiento de las dislocaciones por el material, por lo que estas se concentran en zonas determinadas que podrían dar lugar a la deformación localizada y al fallo del material en esas zonas.

Para evaluar el efecto que tiene la irradiación en un material, este se investiga mediante técnicas de caracterización antes y después del proceso de irradiación al que es sometido el material con el fin de analizar los cambios que se producen en la microestructura. Una de las técnicas más empleadas para la caracterización de materiales es precisamente la microscopía electrónica de transmisión, ya que es una técnica muy potente para la observación de las estructuras cristalinas y los defectos producidos por deformación y por irradiación del material [13].

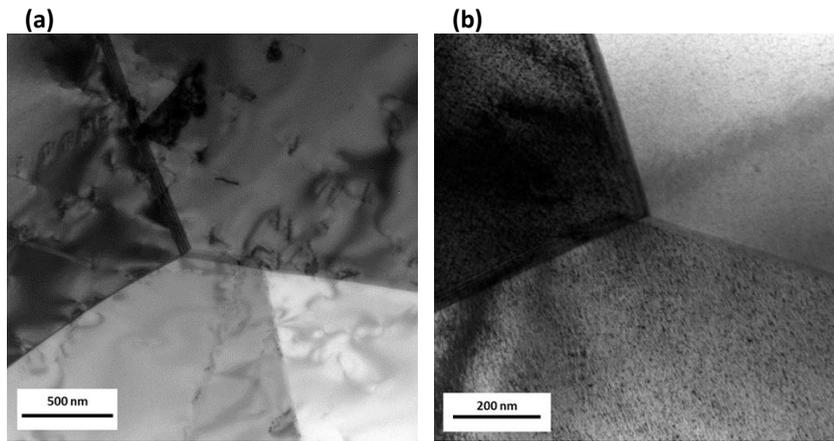


Figura 9. Imágenes tomadas con microscopía de transmisión de (a) el acero inoxidable de tipo 316L en estado de recepción y (b) el acero inoxidable 316L sometido a la irradiación con partículas de alta energía.

La Figura 9.a muestra un ejemplo de la microestructura de un material 316L en estado de recepción, donde se pueden observar varios granos, o regiones con diferente orientación, que se distinguen por el distinto contraste que ofrece, separados por líneas rectas que corresponden con los bordes de grano. Este material presenta alguna dislocación debido al proceso de fabricación, pero no hay un número elevado de defectos remarcables. En la Figura 9.b se puede observar un ejemplo de la microestructura de un acero sometido a la irradiación con partículas de elevada energía, donde se pueden observar también varios granos separados por los bordes de grano, y una estructura punteada que aparece de forma generalizada por el material. Estos puntos se corresponden con los defectos producidos por la irradiación, que a mayores aumentos se puede determinar de qué tipo son y en qué cantidad aparecen, para poder determinar cómo afecta su aparición a las propiedades del material.

CONCLUSIONES

La caracterización microestructural de los materiales metálicos demuestra que, para poder evaluar un material, su durabilidad y su integridad estructural en ambientes tan agresivos como son los ambientes nucleares, es esencial comprender los efectos de la irradiación en la estructura y propiedades de estos materiales. Es necesario seguir investigando esta área para mejorar nuestro entendimiento de los procesos que ocurren en los materiales al estar expuestos a la irradiación y a mejorar nuestra capacidad para predecir y mitigar los efectos de la radiación en los materiales, o de desarrollar nuevos materiales más seguros y duraderos que puedan tener más resistencia a la radiación, y poder así garantizar un futuro más seguro y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] W. D. Callister Jr, "Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales." 3rd Ed, Reverté, 2000.
- [2] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, "Materials Science and Engineering. An introduction" 10th ed. Wiley, 2018.
- [3] ASM International, "ASM Handbook - Volume 9 - Metallography and Microstructures". 2004.

- [4] Departamento de Cristalografía y Biología Estructural, "*Cristallography*" [Online]._Disponible en: https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_03_4.html. Consultado 25 Junio 2023
- [5] D. R. Askeland, P. Fulay; y W. J. Wright, "Ciencia e Ingeniería de Materiales," 6th ed, Cengage Learning, 2012.
- [6] R. R. Egerton, "*Physical Principles of Electron Microscopy. An introduction to TEM, SEM and AEM*", 2nd ed., Springer, 2016.
- [7] J. Goldstein, "*Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis : a text for biologists, materials scientists, and geologists*", 2nd ed., Plenum Press, 1992.
- [8] A. J. Wilkinson and T. Ben Britton, "Strains, planes, and EBSD in materials science," *Mater. Today*, vol. 15, no. 9, pp. 366–376, 2012, doi: 10.1016/S1369-7021(12)70163-3.
- [9] D. B. David B. Williams and C. B. Carter, "*Transmission electron microscopy : a textbook for materials science*", 2nd ed., Springer, 2009.
- [10] J. W. Edington, " *The Operation and Calibration of the Electron Microscope*": Macmillan Education UK, 1974.
- [11] B. H. Sencer, G. M. Bond, M. L. Hamilton, F. A. Garner, S. A. Maloy, and W. F. Sommer, "*Microstructural origins of radiation-induced changes in mechanical properties of 316 L and 304 L austenitic stainless steels irradiated with mixed spectra of high-energy protons and spallation neutrons*," *J. Nucl. Mater.*, vol. 296, no. 1–3, pp. 112–118, 2001, doi: 10.1016/S0022-3115(01)00512-8.
- [12] G. S. Was, "*Fundamentals of Radiation Materials Science. Metals and alloys*" Springer, 2007.
- [13] M. L. Jenkins, M. A. Kirk, "*Characterization of Radiation Damage byTransmission Electron Microscopy*". Institute of Physics Pub, 2001.

ACELERADORES DE PARTÍCULAS

ÓSCAR DURÁN LUCAS

oscar.duran@ciemat.es

RESUMEN

En este artículo se explican brevemente los fundamentos sobre los que trabajan los aceleradores de partículas, los tipos de aceleradores que se pueden encontrar y qué aplicaciones tienen hoy en día o tendrán en un futuro próximo para la sociedad, tanto los propios aceleradores como sus tecnologías asociadas. Además, una vez puesto el contexto, explicaremos la función que tiene el CIEMAT como impulsor tecnológico a través de la Unidad de Aceleradores de Partículas y expondremos como ejemplo el desarrollo que se ha llevado a cabo en la Unidad de un electroimán superconductor, el denominado MCBXF, utilizado en un acelerador de partículas. Todo desde una visión abierta que nos permitirá dilucidar qué los hace especiales, a qué problemas concretos responden y dónde más podrían ser utilizados. Se presentan también unas ligeras nociones de cómo se llevan a cabo los procesos que tienen lugar dentro de un acelerador de partículas y se incluyen finalmente unas referencias a publicaciones científicas por si el lector está interesado en profundizar en los detalles de alguna de las tecnologías.

INTRODUCCIÓN

La televisión de rayos catódicos, el descubrimiento del bosón de Higgs, la protonterapia para tratar tumores, los radiofármacos para de la tomografía por emisión de electrón-positrón (PET), el tren que levita, las resonancias magnéticas, la investigación en antimateria, el estudio de obras de arte... Todos estos conceptos, que parecerían muy poco relacionados a primera vista, tienen como denominador común a los aceleradores de partículas, bien porque los utilizan directamente o bien porque utilizan las tecnologías que fueron desarrolladas para su construcción. Los aceleradores de partículas son uno de los mejores ejemplos de cómo la tecnología, de la mano de la ciencia, responde a algunos de los retos más complicados que propone la sociedad. Se fundamentan en principios físicos que son utilizados cotidianamente en otras aplicaciones por el público general, pero su aplicación real lleva a posiblemente unos de los equipos tecnológicos más complejos y multidisciplinarios de la actualidad. Además, la tecnología empleada aplica las teorías científicas más avanzadas, ya que es necesario aunar en un mismo equipo conceptos tan a la vanguardia como alto vacío, temperaturas criogénicas, superconductividad, precisiones micrométricas o escalas temporales de nanosegundos.

¿CÓMO FUNCIONA UN ACELERADOR DE PARTÍCULAS?

Un acelerador de partículas es un equipo científico-tecnológico extremadamente complejo que utiliza campos electromagnéticos para acelerar haces de partículas y conseguir aumentar su energía [1]. Esas partículas suelen ser partículas cargadas, normalmente electrones, protones o iones. Se trata de elementos extremadamente pequeños que no pueden ser acelerados o guiados por elementos mecánicos. Pero, si no podemos tocarlos, ¿cómo los aceleramos?

Para conseguir interactuar con las partículas, nos aprovechamos de su carga eléctrica y utilizamos campos electromagnéticos que consiguen aplicar fuerzas sobre ellas. En concreto, se utilizan campos eléctricos para acelerar o frenar las partículas y campos magnéticos para guiarlas.

Al aplicar una diferencia de potencial a una carga, ésta aumenta su energía. Existen diferentes formas de proporcionar esa diferencia de potencial. Por ejemplo, se puede utilizar equipos de corriente continua, de corriente alterna o cavidades de radiofrecuencia. Una de las dificultades tecnológicas cruciales en este sentido es la sintonización de las cavidades de radiofrecuencia, que requieren una geometría muy precisa y limpieza extrema para conseguir sincronizar el cambio de polaridad con los haces de partículas que llegan a pasar a través de las cavidades a prácticamente la velocidad de la luz.

Con esta aceleración conseguimos partículas con mucha energía, pero que viajan en línea recta. Si necesitamos guiarlas a través de un recorrido deseado, es necesaria la utilización de otras fuerzas que actúen sobre las partículas y que las desvíen controladamente de esa línea recta. Para ello, se utilizan los campos magnéticos. El principio fundamental en el que se basan es que una partícula cargada en movimiento que atraviesa un campo magnético, recibe una fuerza que es perpendicular a ambos. Así, podemos modificar la trayectoria de las partículas para guiarlas hacia donde más nos interese según la aplicación.

Para conseguir los campos magnéticos necesarios se utiliza la tecnología de los imanes. Éstos pueden ser bloques de material ferromagnético que, una vez magnetizados, mantienen la generación de campo magnético. Un ejemplo cotidiano serían los imanes que todos tenemos en la puerta del frigorífico. Para el uso en aceleradores, son necesarios imanes mucho más potentes que éstos, y por tanto de otros materiales. También existen otros imanes, los electroimanes, que están formados por espiras de cable enrollado, o bobinas, de tal modo que cuando una corriente eléctrica circula por los cables conductores se genera un campo magnético. Ejemplos cotidianos serían las bobinas de los motores eléctricos de electrodomésticos, las cocinas de inducción o los coches eléctricos. Sin embargo, los enormes campos magnéticos necesarios requieren imanes muy potentes y compactos, por lo que se recurre a tecnologías como la superconductividad.

Uniendo los dos conceptos de aceleración y guiado de manera sucesiva a las partículas, éstas pueden llegar a adquirir velocidades próximas a la velocidad de la luz. En grandes aceleradores, para conseguir la mayor energía posible, se utilizan principalmente dos estrategias que llevan a dos de los aceleradores más conocidos, el acelerador lineal y el acelerador circular. Otra manera habitual de acelerar las partículas es mediante el uso de ciclotrones [2].

ACELERADORES LINEALES DE PARTÍCULAS

En un acelerador lineal, como su nombre indica, la trayectoria principal es una línea recta, por lo que no se necesita mucho espacio para albergar imanes que modifiquen la trayectoria. En su lugar, se intenta generar la mayor aceleración posible en el menor espacio, por lo que los elementos protagonistas y quienes determinarán la energía que pueden alcanzar las partículas son las cavidades aceleradoras de radiofrecuencia. Éstas se disponen sucesivamente para sumar los impulsos de cada una de ellas.

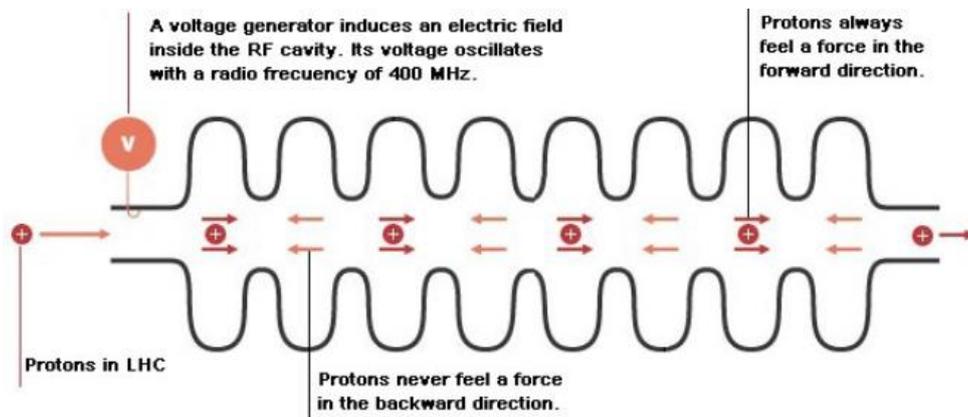


Figura 1. Principio funcionamiento de las cavidades resonantes de radiofrecuencia [2].

ACELERADOR CIRCULAR DE PARTÍCULAS

En un acelerador circular de partículas, sin embargo, el concepto se basa en pasar muchas veces por el punto de aceleración, dando un pequeño impulso en cada paso. En este caso, el espacio para cavidades aceleradoras será menor, cediendo el protagonismo a los imanes. Los imanes deberán mantener dando vueltas a las partículas que intentan escaparse por la línea tangente a la circunferencia, cada vez con mayor energía. La energía máxima que se consiga en el acelerador estará determinada por la potencia de los imanes.

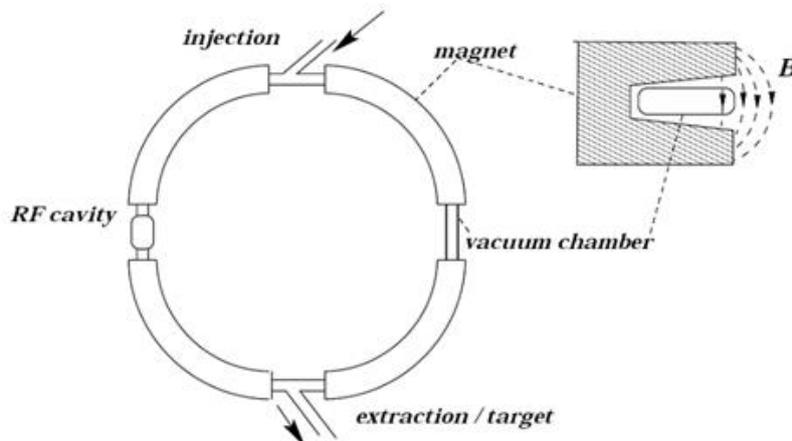


Figura 2. Esquema básico de un acelerador circular [2].

CICLOTRÓN

Otra manera de acelerar partículas son los ciclotrones, que utilizan una combinación de campos eléctricos y magnéticos para acelerar las partículas en una trayectoria en espiral. Las partículas son inyectadas en el centro y reciben aceleraciones por campo eléctrico sucesivas en cada vuelta. Como el campo magnético es constante y las partículas cada vuelta son más energéticas, su radio de curvatura va aumentando. Así se consigue la trayectoria en espiral hasta que las partículas salen por el exterior con la energía máxima proporcionada por el acelerador.

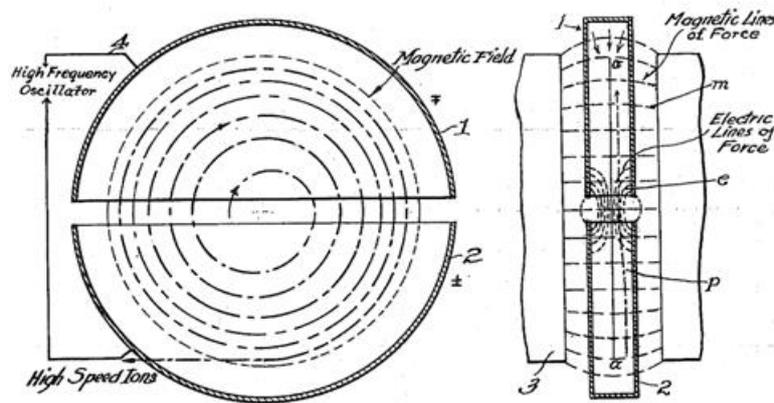


Figura 3. Esquema básico de un ciclotrón [3].

COMPLEJIDAD DE LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Los principios físicos aplicados para acelerar partículas son utilizados por la sociedad en muchas aplicaciones cotidianas. Aplicamos diferencias de potencial a todos los equipos eléctricos que conectamos a la red eléctrica y utilizamos campos magnéticos en los motores o generadores eléctricos que estamos acostumbrados a manejar tanto a nivel doméstico como industrial.

Sin embargo, la elevada complejidad de los equipos utilizados en aceleradores de partículas se deriva de la potencia de los equipos necesaria para conseguir altas energías en las partículas, lo compactos que han de ser los equipos para que las infraestructuras puedan ser dimensionalmente viables y en las enormes precisiones que son requeridas para poder hacer colisionar los haces de partículas. Todos estos requisitos se traducen en complejidad y conocimiento profundo de todos y cada uno de los componentes que forman parte del acelerador. Todo ello exige la vanguardia de la tecnología y necesita un gran esfuerzo de los centros de investigación y de las empresas asociadas para hacerlos realidad.

Para poner unas comparativas que acerquen al mundo cotidiano las magnitudes de los aceleradores, aquí mostramos algunos de los logros científico-tecnológicos que se consiguen en el acelerador más grande construido hasta la actualidad, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, en Ginebra [4]:

- Los imanes que guían las partículas son 1.000 veces más potentes que los que podemos tener en el frigorífico y 100.000 veces más potentes que el campo magnético de la tierra.
- Es el circuito que alcanza las velocidades más altas del mundo. Se han llegado a acelerar partículas hasta el 99,9999991 % de la velocidad de la luz en vacío, el límite de velocidad en el universo.
- Es, también, el frigorífico más grande del mundo. Los imanes deben estar a una temperatura de alrededor de $-271,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, a sólo 1,8 grados del cero absoluto. La temperatura del espacio exterior es de aproximadamente $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, más caliente que los imanes del LHC.
- El LHC es el lugar más vacío del sistema solar. Esto es debido a la necesidad de que las partículas, cuando se aceleran, no choquen con moléculas de gas.

¿PARA QUÉ UTILIZAMOS LAS PARTÍCULAS ACELERADAS?

Hasta ahora, hemos descrito brevemente los equipos principales necesarios para conseguir acelerar partículas a altas energías y guiarlas por una trayectoria deseada. En este apartado explicaremos algunas de las aplicaciones directas de esos haces de partículas acelerados a altas energías.

La primera aplicación que viene a la cabeza cuando hablamos de grandes aceleradores de partículas es la de la física fundamental y la serie Big Bang Theory. Uno de los usos más conocidos de los aceleradores de partículas consiste en guiar dos haces enfrentados y hacerlos colisionar en una región donde podamos estudiar qué ocurre cuando interaccionan estas partículas con tanta energía. Eso es lo que hacen los colisionadores de partículas. De esta manera, se pueden estudiar las interacciones de la materia, generar nuevas partículas, probar teorías propuestas por la física teórica o explorar la naturaleza de las fuerzas entre partículas.

Pero curiosamente, esos increíblemente complejos equipos son sólo la punta de lanza de los aceleradores de partículas. Sólo el 1 % de los aceleradores del mundo se dedica a física de partículas aplicada. Son el equivalente a la Fórmula 1. Para ellos se necesitan las tecnologías más complejas y precisas. Sin embargo, aunque su número sea muy reducido y su coste elevado, de lo aprendido gracias a su desarrollo se nutren el resto de aceleradores para acercar a la sociedad los beneficios de estos desarrollos científico-tecnológicos.

En el mundo existen decenas de miles aceleradores de partículas, de los que la gran mayoría se dedican a las aplicaciones médicas. El principal campo de aplicación es el del diagnóstico y tratamiento del cáncer. Algunos ejemplos son:

- Radioterapia convencional. Se utilizan los aceleradores de partículas para generar y proveer rayos X de alta energía o haces de electrones. Éstos son dirigidos hacia el tumor desde diferentes ángulos para atacarlo de manera precisa. Se sitúan unos colimadores entre el paciente y la salida del acelerador que reproducen la forma del tejido a irradiar y minimizan la exposición de los tejidos sanos.
- Hadronterapia. En lugar de atacar los tumores con rayos-X o electrones, una alternativa novedosa es la de atacarlos con hadrones, principalmente protones. En ese caso, es posible controlar con mayor precisión la distribución de la dosis en profundidad, reduciendo la afectación a los tejidos sanos colindantes.

El reto se encuentra de nuevo en la tecnología, ya que este tratamiento requiere cálculos muy precisos y elementos de control muy sofisticados para proveer de un haz mucho más preciso en dimensiones y energía. Estos aceleradores de partículas son por tanto mucho más complejos que los de radioterapia convencional y son posibles gracias a todo lo aprendido en las grandes instalaciones científicas.

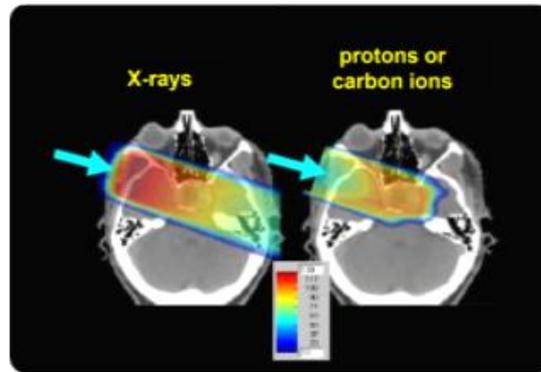


Figura 4. Distribución de dosis mediante radioterapia convencional vs. hadronterapia.

- Radiofármacos para diagnóstico en escáneres PET. En el caso del diagnóstico de la tomografía por emisión de electrón-positrón (PET), se utilizan marcadores radiactivos que, adheridos a la glucosa, permiten diagnosticar las zonas afectadas por el tumor. En este caso, los aceleradores no forman parte del equipo de diagnóstico, sino que se utilizan para producir los radiofármacos que actuarán como marcadores. En este sentido, aceleradores de partículas suficientemente compactos, permitirían producir los radiofármacos en el hospital y reducir la dosis que recibe el paciente.

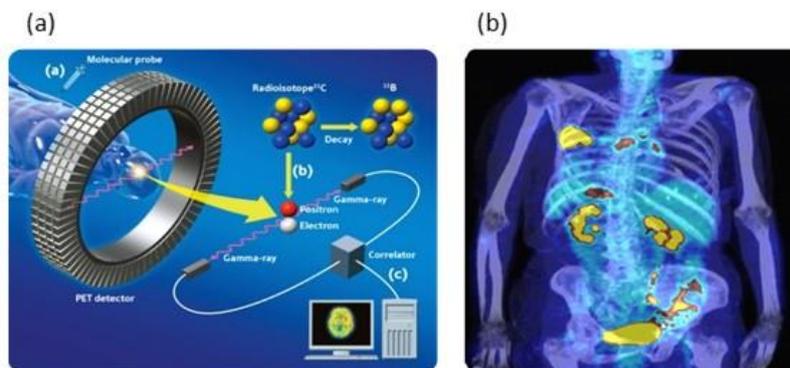


Figura 5. (a) Infografía de un escáner PET. (b) Resultado del escáner.

Además de la medicina sobre el cáncer, los aceleradores de partículas pueden ser utilizados como equipos de ensayos para muchas disciplinas. En el ámbito de la energía, pueden ser utilizados como fuentes de neutrones para estudiar cómo se comportarán los materiales en centrales nucleares. También pueden ser utilizados como herramienta de investigación para el tratamiento de los residuos nucleares.

En el ámbito de la investigación y desarrollo, los aceleradores de partículas son además muy útiles como fuentes de luz de sincrotrón. Este tipo de luz permite analizar a nivel atómico y molecular las propiedades de la materia, convirtiéndolos en los microscopios más grandes del mundo. De tal modo, pueden ser utilizados en temas tan diversos como la física, la química, el patrimonio histórico, el medio ambiente y un largo etcétera. Un buen ejemplo en la investigación española es el [Sincrotrón Alba](#).

Pero no sólo los aceleradores completos tienen una aplicación para la ciencia y la sociedad. Al tratarse de equipos extremadamente complejos tanto a nivel global como en cada uno de sus

elementos, muchas de las tecnologías y los subequipos que son desarrollados para las grandes instalaciones de aceleradores pueden ser utilizadas posteriormente en otros ámbitos. Por ejemplo, el desarrollo que se ha realizado en el campo de los imanes, muy alto vacío o criogenia, ha permitido el desarrollo de equipos cada vez más potentes y sofisticados para aplicaciones como la fusión nuclear [6], la resonancia magnética [7] o el transporte por tren levitado [8].

Como hemos podido observar, los aceleradores de partículas son elementos extremadamente complejos, donde la tecnología y la ciencia han unido sus fuerzas y consiguen dar respuesta a algunos de los retos más complicados y actuales de la sociedad. En el próximo apartado, mostraremos el papel que juega el CIEMAT en ese entramado tecnológico y expondremos un ejemplo de aplicación con sus particularidades y aportaciones directas e indirectas a la comunidad, tanto científica como social.

LA UNIDAD DE ACELERADORES DE PARTÍCULAS DEL CIEMAT

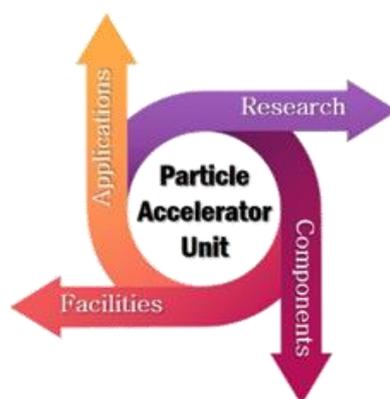


Figura 6. Logo de la unidad de aceleradores de partículas.

La Unidad de Aceleradores de Partículas, que pertenece a la División de Ingeniería Eléctrica, es capaz de realizar todo el proceso de desarrollo de los equipos en los que participa. Empezando por los cálculos analíticos de los equipos, el diseño conceptual, los cálculos mediante simulaciones por ordenador, el diseño detallado del componente, hasta el desarrollo del utillaje para su fabricación y la creación de planos. También produce prototipos que validan tanto el equipo como los diferentes procesos. En ese sentido, se realiza el seguimiento de la fabricación de utillaje en la industria privada, se realiza la fabricación de los componentes más complejos de los equipos como las bobinas y se realizan los ensamblajes para llegar al prototipo. Además, la Unidad ensaya esos prototipos para validar las especificaciones para las que han sido diseñados. Por último, participa en la transferencia de conocimiento a las empresas que harán la producción en serie del producto, siendo una pieza clave en el seguimiento de la serie. Todo este proceso se realiza tanto en proyectos de componentes para aceleradores, así como de secciones de aceleradores y de aceleradores completos. En función de los acuerdos de los proyectos, la Unidad participa parcial o totalmente en el conjunto de dichas actividades.

En todos ellos, el objetivo principal de la Unidad es el de proponer soluciones innovadoras y viables para los complejos equipos utilizados en medicina y en grandes instalaciones científicas.

En la actualidad, la Unidad está inmersa en los siguientes ámbitos de investigación:

- Terapia de iones. Financiado por los fondos IKERTU-HAZITEK, en el que la Unidad está desarrollando el sistema de inyección, donde se encuentran equipos como una fuente de iones de carbono C^{6+} , un acelerador y focalizador llamado RFQ y unas cavidades aceleradoras IH. [9]



Figura 7. (a) fuente de iones $C6+$. (b) RFQ. (c) Diseño cavidades IH.

- Producción de radioisótopos: Dentro del Tecnologías de la Imagen Molecular Avanzadas (proyecto AMIT), se está desarrollando un acelerador completo basado en un ciclotrón compacto con imanes superconductores para la producción de radioisótopos necesarios para el diagnóstico por PET. Además, se ha creado una empresa spin-off a raíz de dicho proyecto [10]. Entre otros conceptos innovadores, se está desarrollando una fuente de iones que utiliza un sistema por radiofrecuencia, alternativo a las fuentes de iones convencionales.



Figura 8. (a) Sistema ciclotrón completo. (b) Fuente de iones.

- Imanes de alto campo. Para el desarrollo de futuros aceleradores circulares que consigan más energía en las colisiones, uno de los grandes retos es el desarrollo de imanes suficientemente potentes para mantener las partículas en la circunferencia del acelerador. La unidad está participando en el desarrollo de estos imanes dentro del acuerdo HFM-PRISMAL. [11]

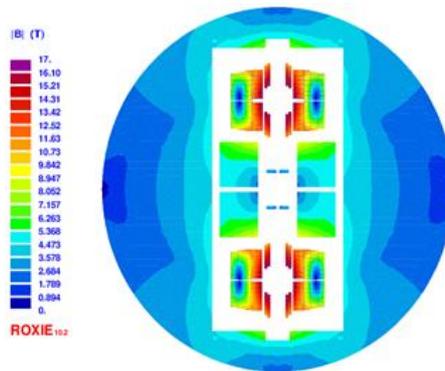


Figura 9. Simulación de la configuración del imán para HFM – PRISMAC.

- Imanes para aceleradores lineales. Aunque en los aceleradores lineales los equipos protagonistas sean las cavidades de radiofrecuencia, los imanes también son necesarios para adaptar la forma de los haces y corregir sus posibles desviaciones. En ese contexto, la unidad está trabajando, en el contexto del proyecto VADER-I.FAST, en un imán dipolo con campo variable longitudinalmente utilizando imanes permanentes que consigue reducir la emitancia del haz. Además, bajo el proyecto MagNEXT, se está desarrollando un imán focalizador superconductor enfriado por conducción que sería utilizado en el International Linear Collider (ILC) [11].

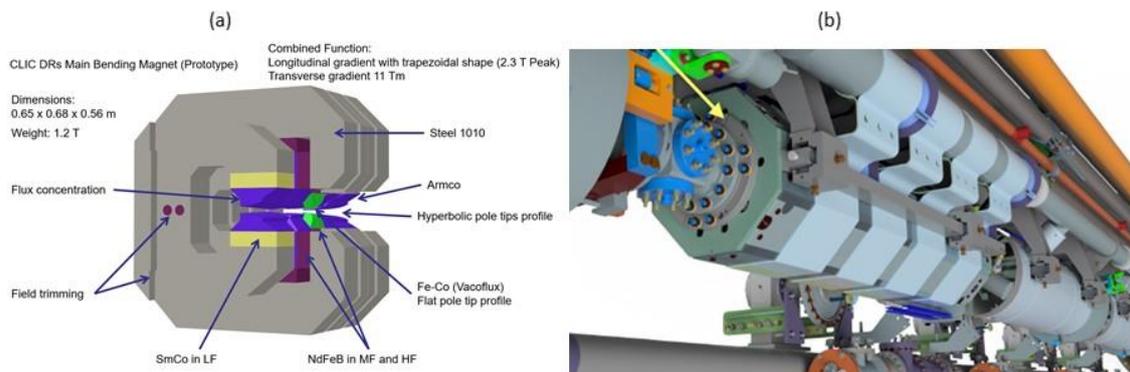


Figura 10. (a) Diseño conceptual del imán de VADER. (b) Diseño conceptual del imán de MagNEXT [12].

- Imanes para aplicaciones médicas: con el objetivo de realizar el guiado de las partículas antes de la inyección al paciente, se están desarrollando imanes en configuración CCT de geometría curva (proyecto HITRI) y de geometría recta con función combinada (I.FAST). La Unidad participa en la fabricación de los prototipos que probarán la validez del diseño [11].

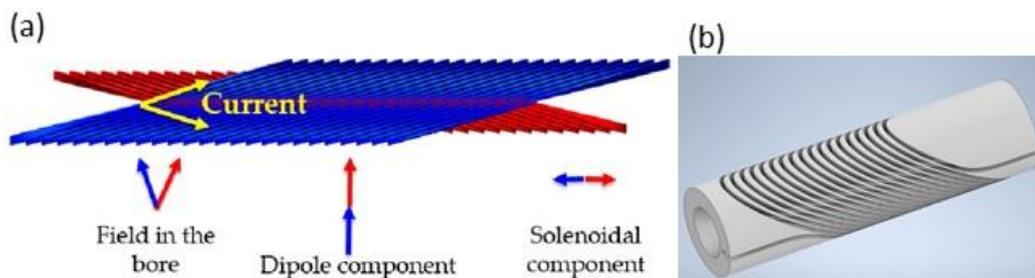


Figura 11. (a) Ejemplo conceptual del funcionamiento de un imán CCT. (b) Ejemplo de mandrino sobre el que se bobina un imán CCT.

- Imán corrector dipolo anidado para el proyecto HL-LHC: Bajo el proyecto PRISMAC, se ha realizado el desarrollo de un imán muy particular, el llamado MCBXF, que es un buen ejemplo de proyecto de investigación con aportes tecnológicos que pueden ser transmitidos a la sociedad por la creación de conocimiento tanto en el sector de investigación como en el industrial. Lo explicaremos con un poco más de detalle en el siguiente apartado. Además de su función en el LHC, este imán podría ser utilizado como guía para equipos de radioterapia médica.

EL DESARROLLO DEL IMÁN SUPERCONDUCTOR MCBXF

El imán superconductor denominado MCBXF está incluido en las actualizaciones del nuevo acelerador de partículas en el CERN, HiLumi, un proyecto que pretende aumentar en diez veces la luminosidad, o número de colisiones por segundo, del LHC (Gran Colisionador de Hadrones) en los próximos años, con el objetivo de aumentar la estadística de colisiones para poder estudiar con más detalle los componentes fundamentales de la materia [13].

Este imán superconductor se encarga de la corrección de la órbita del haz de partículas, justo al lado de los experimentos ATLAS (Aparato Toroidal del LHC) y CMS (*Solenoid Compacto de Muones*), para conseguir un posicionamiento adecuado de los haces y permitir su correcta colisión. Para ello, el imán cuenta con dos dipolos anidados que se encargan de proporcionar correspondientemente las componentes horizontal y vertical del campo magnético necesario en cada momento. Esta configuración lleva al límite la tecnología de las bobinas fabricadas con cable superconductor de NbTi (Niobio-Titanio). En conjunto el imán mide 1,5 m de longitud, pesa algo más de 3 toneladas y proporciona un campo integrado de 2,5 Tm [14].



Figura 12. Fase de montaje del dipolo exterior. Se pueden observar las cuatro bobinas que conforman los dos dipolos, los collares metálicos que las mantienen en su posición y el utillaje para su cierre con la prensa.

El proceso del imán ha sido un claro ejemplo de método científico, donde tras una fase de diseño, cálculos electromagnéticos y mecánicos, simulaciones y fabricación de modelos mecánicos, se realizaron dos prototipos en los que se validó la robustez de cada uno de los dipolos energizados individualmente. Sin embargo, al energizar ambos conjuntamente, el enorme par que intenta alinear los dos dipolos conseguía deformar las bobinas y causar su transición a estado resistivo, fenómeno llamado quench. Es importante recordar que el par nominal alcanza los 140 kNm por

metro de longitud del imán, equivalente al de 140 motores eléctricos como los que equipan al Porsche Taycan Turbo S. Pese a que a nivel operativo esta propuesta podría ya considerarse funcional, en los ensayos no se alcanzaron los valores nominales de las especificaciones. Para intentar cumplir la totalidad de los requisitos, se realizó un pequeño ajuste en el diseño de las bobinas, que se implementó en el primer imán de la serie. Con esta solución, el imán consiguió completar ciclos de inversión de par, demostrado crítico en los anteriores prototipos. Alcanzó corrientes nominales combinadas en ambos dipolos y pasó por los diferentes puntos extremos de operación, todo sin transitar a fase resistiva. Con estos magníficos resultados, el diseño fue validado. Además, los excelentes resultados cosechados tras estos cambios, demostraron no sólo que los imanes estaban listos para su producción en serie, sino también el potencial de todas las metodologías de diseño y técnicas de fabricación descritas durante este desarrollo. El proceso completo de desarrollo del imán ha sido motivo para una tesis doctoral en la unidad [15].

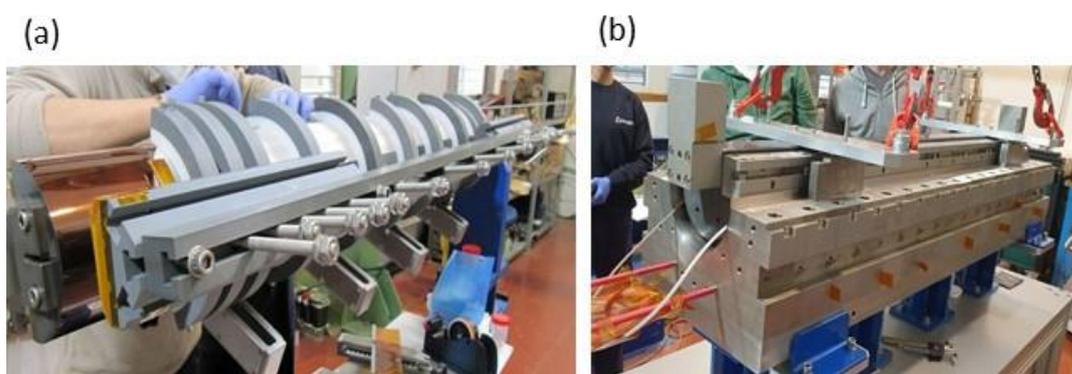


Figura 13. (a) Fase de bobinado MCBXF. (b) Fase de impregnación de bobinas MCBXF.

Además de un ejemplo de contribución tecnológica a la gran instalación científica del CERN, este proyecto es un buen ejemplo de transmisión de conocimiento y cooperación con la industria.

Una vez validado el diseño con el primer imán de serie, la fabricación en serie de los 17 imanes adicionales MCBXF, que serán instalados durante la siguiente parada del LHC en 2025, está siendo realizada por la industria española, en concreto la empresa Elytt Energy SL.

La complejidad de este imán requiere que varios actores industriales participen en la fabricación de componentes de las bobinas, componentes del imán y utillaje para ambos. Algunos de los componentes son de elevada complejidad y precisión y se ha colaborado con la industria para sacarlos adelante. Es el caso de los collares de acero inoxidable que se fabricaron por troquel de corte fino junto con la industria Inecfi, o los espaciadores de cabeza de las bobinas, que se han realizado por fabricación aditiva de acero inoxidable en la empresa Egile. Otras empresas nacionales que también han participado en la fabricación, tanto de componentes del imán como de utillaje, son: APM, Apteca, Aratz, Aretarp, Bronymec, Finitec, FOCS, GAZC, Jucar Utillajes, Ramem, Teknicalde y Vacuum Projects.

CONCLUSIONES

Los aceleradores de partículas son equipos tan complejos que requieren un trabajo conjunto enorme de diferentes actores de la ciencia, la tecnología y la sociedad. Suponen uno de los mejores ejemplos de cooperación tecnológica de la actualidad y su mejora es uno de los retos más desafiantes que tanto la ciencia como la sociedad proponen a la tecnología.

Además, todo lo aprendido gracias a estos avances tecnológicos, puede ser aplicado directa o indirectamente a aplicaciones médicas, de energía o de transporte, solucionando algunos de los problemas más desafiantes a los que se enfrenta la sociedad.

Desde el CIEMAT, intentamos aportar como hemos explicado nuestro impulso a este vector tecnológico de innovación que tantos beneficios aporta a la ciencia y a la sociedad.

REFERENCIAS

- [1] B. J. Holzer, «Introduction to Particle Accelerators and their Limitations», CERN Document Server. [Internet]. [Consultado: 18 de marzo de 2018]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2203629>.
- [2] J. Barranco García, «Introducción a la física de aceleradores», 2010. [Internet]. Disponible en: <https://indico.cern.ch/event/101994>.
- [3] IAEA, «¿Qué son los ciclotrones? ¿Dónde se hallan?». [Internet]. [Consultado: 25 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-un-ciclotron-donde-se-halla>.
- [4] Fundación Aquae, «12 curiosidades sobre el LHC del CERN». [Internet]. [Consultado: 28 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/12-curiosidades-sobre-el-lhc-del-cern/>.
- [5] ITER, «ITER Machine». [Internet]. [Consultado: 28 de junio de 2023]. Disponible en: <http://www.iter.org/mach>.
- [6] Paris-Saclay, «MRI - Paris Saclay». [Internet]. [Consultado: 28 de junio de 2023]. Disponible en: <https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/supra/en/applications-medical-irm-more.php>.
- [7] US Department of Energy, «How Maglev Works». [Internet]. [Consultado: 28 de junio de 2023]. Disponible en: <https://www.energy.gov/articles/how-maglev-works>.
- [8] C. Oliver, «Status of accelerators R&D at CIEMAT», Comunicación interna en la sede del CIEMAT 22 de marzo de 2023.
- [9] Cyclomed, «Cyclomed - Medical accelerators». [Internet]. [Consultado: 28 de junio de 2023]. Disponible en: <https://www.cyclomed.tech/index.php/medical-accelerators/>.
- [10] F. Toral, «Status of magnet R&D at CIEMAT», Comunicación interna en sede del CIEMAT.21 de diciembre de 2022.

- [11] Y. Arimoto *et al.*, «Design Study of a Superconducting Quadrupole Magnet System Sustainable Under Dark Current Heating in ILC Main Linac», *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, n.º 5, pp. 1-4, ago. 2023, doi: 10.1109/TASC.2023.3252484.
- [12] G. Apollinari *et al.*, *High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report V. 0.1*, vol. Vol. 4/2017. en CERN Yellow Reports: Monographs, vol. Vol. 4/2017. Geneva: CERN, 2017. [Internet]. Disponible en: <https://doi.org/10.23731/CYRM-2017-004>
- [13] CIEMAT, «El primer imán de serie del imán MCBXF supera con éxito los ensayos en el CERN». Consultado: 28 de junio de 2023. [Internet]. Disponible en: <https://www.ciemat.es/portal.do?IDM=61&NM=2&identificador=2349>.
- [14] J. Á. García-Matos, «Nested Cos-Theta Superconducting Accelerator Dipoles with High Radiation Resistance: Application to the HL-LHC Orbit Correctors», PhD, E.T.S.I. Industriales (UPM), 2022. doi: 10.20868/UPM.thesis.72080.

APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

MARTA IBÁÑEZ MORAGUES

Marta.Ibanez@ciemat.es

RESUMEN

La radiactividad consiste en la emisión de partículas o energía por átomos inestables llamados radioisótopos. Dependiendo de la naturaleza de esta radiactividad, esta afecta de forma distinta a la materia, y del mismo modo a los organismos vivos produciendo daños y mutaciones. Además, existen diferentes tipos de radiaciones ionizantes que difieren en el tipo de partículas que se producen y por tanto en el modo en que interaccionan con la materia. Para protegernos de estas radiaciones se utilizan diferentes estrategias de prevención, seguimiento y protección. Pero a pesar de estos efectos, las radiaciones ionizantes pueden aplicarse a distintos campos, tanto en el campo de la industria, energía y salud como en investigación. En la Unidad de Aplicaciones Médicas de las Radiaciones Ionizantes abordamos el uso de las radiaciones ionizantes desde diferentes perspectivas, dividiendo nuestras investigaciones en cuatro áreas: la producción de radioisótopos y radiofarmacia, en la que se estudian diferentes métodos de producción de radioisótopos así como la optimización de los procesos para producir radiofármacos eficaces para tratamiento y diagnóstico de distintas patologías; la imagen molecular por tomografía por emisión de positrones en combinación con Tomografía Computarizada (PET/CT), en la que se realizan estudios preclínicos con moléculas marcadas con radioisótopos de interés biomédico in vivo tanto a nivel diagnóstico como terapéutico, monitorización del sistema inmune, y estudio de la expresión génica entre otros; instrumentación y simulación en medicina nuclear y radioterapia, en la cual se simulan por Monte Carlo los tratamientos que se pueden dar en radioterapia y se optimizan los procesos de irradiación para cada tipo de estudio, así como el desarrollo de detectores para mejorar el control de calidad de los tratamientos de protonterapia; y estudios en radiobiología, enfocados en los efectos biológicos de las distintas modalidades de irradiación (radioterapia convencional, hadronterapia y radioterapia FLASH), búsqueda de métodos óptimos de tratamiento y fraccionamiento de las dosis y cómo afectan estos a su combinación con tratamientos de inmunoterapia.

INTRODUCCIÓN: ¿QUÉ ES LA RADIATIVIDAD?

Antes de tratar de entender qué es la radiactividad, es necesario recordar cómo es la estructura del átomo. En especial su núcleo, pues es ahí donde se produce la radiactividad.

El átomo consta de un núcleo alrededor del cual orbitan unas diminutas partículas con carga negativa, los electrones. El núcleo contiene, a su vez, otros dos tipos de partículas, los protones y los neutrones. Los primeros tienen carga positiva y los segundos no tienen carga (Figura 1) [1].

Como la materia es neutra y está constituida por átomos, las cargas positivas de los protones se compensan con las negativas de los electrones y por eso, en un átomo, hay tantos protones como electrones. Los electrones se distribuyen alrededor del núcleo en diferentes capas y en cada una de ellas sólo puede haber un número determinado de electrones. Si por cualquier motivo, falta un electrón de estas capas, es decir, queda una vacante, será ocupada por otro electrón de una capa superior, si lo hay.

Prácticamente toda la masa del átomo se encuentra en el núcleo, de ahí que a la suma de partículas que tiene su núcleo (protones + neutrones) se le denomine número másico, que se simboliza con la letra A. Los electrones no se tienen en cuenta porque la masa de un electrón es casi 2.000 veces

menor que la del neutrón o protón, que son similares. Por otro lado, el número atómico, se simboliza por la letra Z e indica los protones que hay en el núcleo atómico, y es el que define a los elementos químicos. Si se conoce el número atómico se sabe qué elemento es [1].

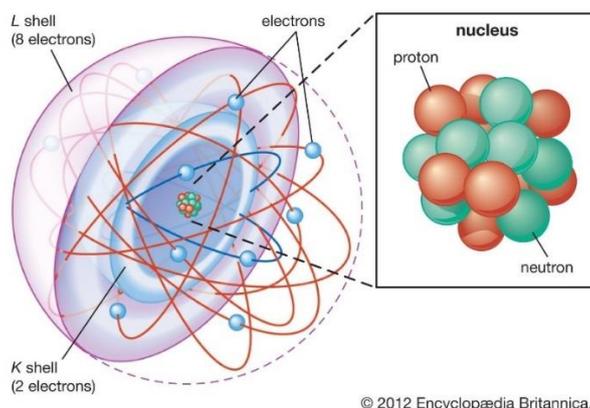


Figura 1. Modelo de estructura del átomo, su núcleo y su corteza. Están representadas las cortezas L y K de un átomo de neón.

Cuando un átomo reacciona químicamente, puede ganar, perder o incluso compartir electrones para formar moléculas o iones cargados negativamente (exceso de electrones) o positivamente (defecto de electrones). Pero esto sólo ocurre en la corteza del átomo. En las reacciones químicas intervienen las capas electrónicas y no hay ninguna transformación o cambios en el núcleo. Pero en el caso de que los cambios se produzcan en el núcleo, entonces es cuando se habla de radiactividad.

Cómo definición, podríamos decir que la radiactividad es la emisión de energía o de partículas que producen algunos cuerpos y que se propaga a través del espacio. Este fenómeno físico consiste en que el núcleo de un átomo inestable (radiactivo) sufre una transformación. En física nuclear lo importante es el núcleo, por lo que a estos átomos se les llama nucleídos y si son radiactivos se llaman radionucleidos o radionúclidos. Estos radionucleidos son isótopos radiactivos o radioisótopos de un elemento. Los isótopos son distintos átomos del mismo elemento, es decir con el mismo número de protones (mismo Z), pero con distinto número de neutrones (distinto A). Algunos de estos isótopos inestables, para poder llegar a la estabilidad tienen que producir radiación, en este caso se llaman radioisótopos y la radiación que emiten es ionizante, es decir, es de alta energía y se caracteriza por tener suficiente energía como para arrancar un electrón de otro átomo y causar ionización [1,2].

La radiación ionizante se puede clasificar según el tipo de emisión que tenga el átomo, normalmente en forma de partículas (alfa o beta) o en forma de radiación electromagnética (radiación gamma o emisión de rayos X).

MODOS DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

La radiación se produce cuando un átomo se desintegra por lo que el tipo de radiactividad que se produce se conoce también como modos de desintegración radiactiva. Los principales son la desintegración alfa, beta y gamma [1].

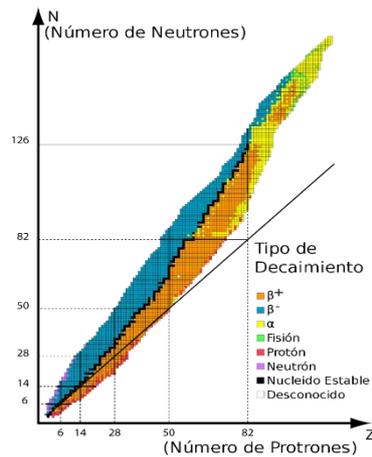


Figura 2. Tipo de decaimiento radiactivo de los nucleidos según su número de protones y neutrones. En negro se puede observar la franja de nucleidos estables. Los núcleos externos a la franja son inestables y producirán radiactividad.

Si observamos la Figura 2, podemos ver cómo dependiendo de si los átomos tienen un exceso o un defecto en protones o en neutrones el modo de desintegración es distinto:

Los que están por arriba tienen exceso de neutrones, y por tanto, para estabilizarse perderán neutrones. El neutrón se convierte en un protón y un electrón, el primero se queda en el núcleo y el segundo sale disparado a toda velocidad. De esta manera, un neutrón desaparece y aparece un protón, con lo cual el núcleo corresponderá a otro elemento distinto y si éste queda dentro de la franja de estabilidad se habrá transformado en un núcleo estable. Al electrón que sale disparado del núcleo se le conoce como partícula beta negativa (β^-), y tienen carga negativa por ser un electrón. Este es el que produce la radiación ionizante. Como vemos las cargas se conservan, una partícula neutra, el neutrón, se convierte en un protón y un electrón, una carga positiva y una negativa (Figura 3) [1,2].

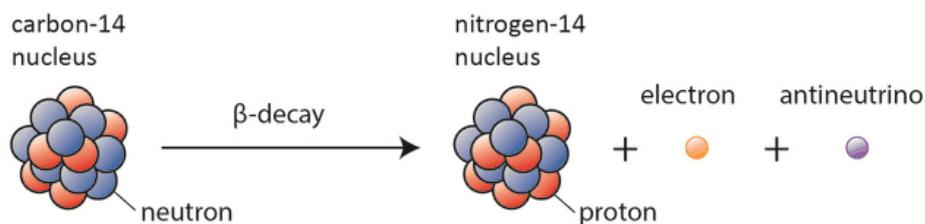


Figura 3. Ejemplo de desintegración beta negativa de un átomo de carbono-14.

Cuando el nucleído está por debajo de la franja negra, tiene exceso de protones, y para lograr la estabilidad uno de los protones se transforma en un neutrón y un positrón (Figura 4.a). Al igual que antes hay conservación de cargas y un protón (positivo) se convierte en neutrón (neutro) y un positrón (positivo). El neutrón se queda en el núcleo y el positrón sale disparado fuera de él a toda velocidad. Este tiene carga positiva y por ello se llama partícula beta positiva (β^+). Pero en este caso ocurre algo adicional, como el positrón es la antipartícula del electrón (ambos tienen la misma masa, pero cargas opuestas) en cuanto se encuentran, se produce una aniquilación partícula-antipartícula, y de acuerdo con la teoría de Einstein, ambas partículas se desintegran completamente, convirtiéndose sus masas en pura energía, concretamente en dos fotones de radiación gamma de

511 keV, que se producen en la misma dirección pero sentidos opuestos (Figura 4.b). Un ejemplo de esta desintegración es la del radioisótopo ^{68}Ga (que se transforma en ^{68}Zn , estable). Este tipo de desintegración es la que se aprovecha para la realización de imágenes por Tomografía por Emisión de Positrones (PET) [1,2,3].

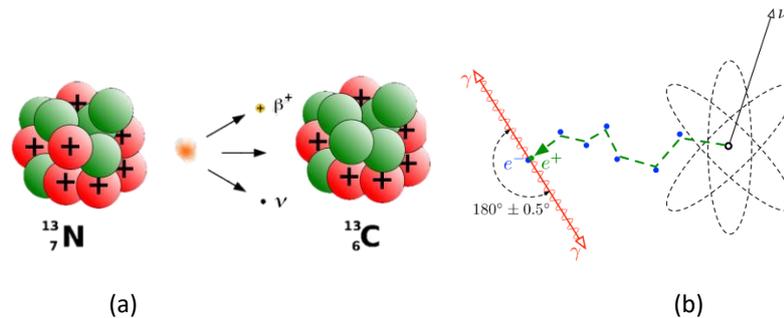


Figura 4. Ejemplo de desintegración beta positiva (a) de un átomo de nitrógeno y (b) de la aniquilación de la partícula beta positiva emitida con un electrón del enterno, formando dos rayos gamma en la misma dirección pero sentidos opuestos.

La desintegración alfa ocurre cuando el núcleo tiene mucha masa y mucha energía; por ello debe desprenderse de una cantidad importante de ella para alcanzar la estabilidad. La partícula alfa está formada por dos neutrones y dos protones, por tanto, una vez emitida, el número atómico del núcleo resultante tendrá dos unidades menos que el inicial, es decir, se convierte en un elemento dos unidades más atrás en el sistema periódico y su número másico habrá disminuido en cuatro unidades. Esta partícula alfa es una partícula de Helio que sale disparada a toda velocidad (Figura 5) [1,2].

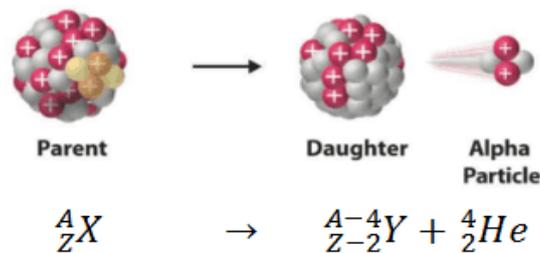


Figura 5. Ejemplo de desintegración alfa con la emisión de la partícula de Helio.

En otros casos el núcleo es inestable de por sí y se estabiliza emitiendo radiación gamma. Este tipo de radiación al igual que los rayos X son radiaciones electromagnéticas, no son partículas como las alfa o beta, por lo que no se llaman partículas gamma, no es materia y no tiene masa, son ondas electromagnéticas. Se consideran formadas por paquetes de energía llamadas fotones. La diferencia entre rayos X y rayos gamma es que los rayos X se producen en la corteza atómica y los rayos gamma provienen del núcleo de los átomos, pero ambos son radiaciones electromagnéticas. Los rayos gamma suelen tener mayor energía, mayor frecuencia y menor longitud de onda [1,2].

PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN

Dependiendo del tipo de radiación de la que estemos hablando, la interacción con la materia es distinta. Mientras que las partículas alfa se frenan simplemente con una hoja de papel, las otras necesitan otro tipo de materiales, por ejemplo, el plomo que frena la radiación gamma. Además, otra propiedad curiosa de la radiación es que disminuye con el tiempo y depende de cada tipo de átomo. Cada radioisótopo tiene lo que se llama un periodo de semidesintegración, que es el tiempo en que su actividad decae a la mitad [1].

EFFECTOS NOCIVOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes van a depender tanto del tipo de radiación, como de su energía, y del periodo de semidesintegración que tengan, así como de la parte del cuerpo que la reciba, ya que los órganos responden de forma distinta a la radiación. En el caso de la radiación alfa, no penetra en el cuerpo y se queda en la capa de células muertas del exterior de la epidermis, por ello no nos hace ningún daño, a no ser que se ingiera/inhale, ya que al pasar dentro del cuerpo sus emisiones impactan con las células del órgano donde se haya fijado el radionucleido y el daño es mucho mayor debido a su gran poder de ionización, llegando a ser muy peligrosa. La radiación beta es poco penetrante, cuando impacta sobre nuestra piel profundiza unos pocos milímetros y se absorben en pocos milímetros, depositando toda su energía. En el caso de la radiación X y gamma, tienen gran poder de penetración y cuando llegan a nuestro cuerpo, parte lo atraviesan (por eso se utiliza en las radiografías) y otra parte es absorbida, esta es la que produce deposición de la dosis.

Cuando la radiación incide sobre las moléculas que componen nuestro organismo se producen ionizaciones haciendo que se rompan moléculas y se produzcan radicales libres al interactuar con el agua. Estos radicales libres pueden dañar de forma indirecta otras moléculas, como el ADN [2].

La radiación ionizante puede producir directamente diversos daños en la molécula de ADN, rompiendo una o las dos cadenas de la doble hélice. Estas roturas también ocurren de forma natural en nuestro cuerpo y en la mayoría de estos casos son reversibles y no suele haber problemas ya que la célula tiene mecanismos para reparar daños y mutaciones. Pero si el daño es importante, puede ser irreversible y producir mutaciones puntuales o un código genético incorrecto. En este momento, la célula también tiene mecanismos para detectarlo, y se produce la muerte celular y en otros casos, si la célula sigue viviendo, una o varias mutaciones [2].

Los efectos biológicos se clasifican en dos tipos, los que se producen con seguridad a partir de una determinada dosis de radiación, efectos deterministas o reacciones tisulares, y los que son probabilísticos, se pueden producir o no, son los efectos estocásticos. Los efectos deterministas pueden ser quemaduras, enrojecimiento de la piel, cataratas y esterilidad, entre otros. Ocurren con dosis altas y suelen ser efectos inmediatos. Los efectos estocásticos pueden ser cánceres, leucemia y efectos genéticos o hereditarios, que pueden pasar a sus descendientes. Se conocen como efectos tardíos y suelen aparecer varios años después de la irradiación. Pueden producirse con poca dosis, pero la probabilidad de que ocurran es muy pequeña y a medida que aumenta la dosis recibida crece la probabilidad de que ocurran. No es necesario que afecten a muchas células, puede ocurrir cuando haya una mutación de unas pocas células [2]. La ciencia que estudia los fenómenos que suceden cuando un tejido vivo absorbe energía cedida por las radiaciones ionizantes se denomina radiobiología.

DETECCIÓN DE LA RADIACIÓN Y PROTECCIÓN

Nuestros sentidos no perciben la radiación, por lo que es importante que existan sistemas de seguimiento, detección y protección para controlarla. Por ello, se aprovechan los cambios y modificaciones en la materia que producen las radiaciones para construir detectores o dosímetros. Como control radiológico se utilizan dosímetros personales, los cuales se llevan a la altura del pecho y nos darán información de la dosis que recibimos en el cuerpo. También se llevan dosímetros de anillo, que nos dan información de la dosis que recibimos en las manos. De esta forma se controla que no se superen los niveles máximos establecidos por la ley, para que no se produzca ningún tipo de daño. Para la protección radiológica y el control de dosis en una zona de trabajo, existen también dosímetros de área.

En el caso de la protección frente a la radiactividad, nos podemos basar en tres pilares básicos: tiempo, distancia y blindaje. Lo primero es intentar reducir el tiempo de exposición a la fuente. Para recibir menos dosis es mejor hacer el trabajo lo más rápido posible y de forma eficiente. También se puede reducir mucho la radiación que se recibe alejándose de la fuente, es decir, con la distancia. Y por último utilizando blindajes que paren la radiación, por ejemplo, teniendo las fuentes radiactivas en contenedores de plomo. El tipo de blindaje dependerá siempre de la radiación con la que se esté trabajando. También podemos evitar la irradiación usando EPIS: delantales plomados, guantes plomados, o gafas con cristal plomado para proteger el cristalino. En cuanto a los EPIS para prevenir la contaminación existe los típicos guantes, cubrecalzados o batas, hasta equipos más específicos que se utilizan en operaciones donde existen contaminaciones de alto riesgo donde se pueden usar trajes estancos combinados con máscaras de filtros, trajes presurizados y equipos autónomos con una botella de aire presurizado.

FUENTES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

La radiactividad proviene de fuentes naturales y fuentes artificiales. Dentro de las fuentes naturales, tenemos la radiactividad procedente de los rayos cósmicos del espacio, del uranio de los suelos y el radón que se produce en la cadena de desintegración de este, y por los radioisótopos presentes en los alimentos, y en nosotros mismos. En el caso de las fuentes artificiales, la radiactividad la utilizamos en exámenes y tratamientos médicos así como para producir energía en la industria nuclear. En este caso estaríamos hablando de aplicaciones de las radiaciones ionizantes [2].

APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

En industria se utilizan radioisótopos con los que se pueden medir por ejemplo el caudal de fluido por una tubería o incluso si existe alguna fuga en ella metiendo un radioisótopo en el inicio y midiendo en el extremo final si se recoge toda la actividad introducida.

El efecto mutacional de las radiaciones ionizantes también se puede utilizar para modificar genéticamente los cultivos y las cosechas. Por ejemplo, se pueden modificar para que un cultivo sea más resistente a enfermedades. También se puede utilizar para erradicar plagas mediante la técnica de insectos estériles (TIE) en la que con radiación gamma se esterilizan insectos de una determinada plaga y se liberan para que disminuya progresivamente la reproducción de dicha plaga.

Respecto a las aplicaciones médicas, su uso en la medicina clínica fue la primera utilidad que se encontró a las radiaciones, siendo los rayos X los que se empezaron a utilizar para diagnóstico de patologías. Poco después, el radio y una gran cantidad de radioisótopos se fueron usando en medicina para diagnosticar enfermedades y como tratamiento. Las radiaciones ionizantes se utilizan principalmente en técnicas de diagnóstico por imagen, terapia con radionúclidos y radioterapia.

DIAGNÓSTICO POR IMAGEN

El diagnóstico por imagen podríamos dividirlo en dos grandes grupos, el que englobaría la radiología (TAC o CT y mamografía), la imagen por ultrasonidos (US) o ecografía y la imagen por resonancia magnética (MRI) y otro grupo englobado en la medicina nuclear, que utiliza radioisótopos para la adquisición de la imagen. En este último tendríamos la tomografía computarizada por emisión de un fotón único (SPECT) y la tomografía por emisión de fotones o positrones (PET). Además, existe la imagen multimodal, en la cual dos o más modalidades de imagen son combinadas en un único instrumento. Se suelen usar para superar algunas de las desventajas asociadas con alguna técnica de imagen proporcionando información sinérgica anatómica y fisiológica al mismo tiempo, por ejemplo, es el caso del uso del equipo PET/CT.

RADIOLOGÍA (TAC, MAMOGRAFÍA)

La imagen médica en general se refiere al uso de escáneres de imagen para obtener de forma no invasiva información *in vivo* de sujetos vivos. Los pacientes o sujetos se introducen en un escáner de imagen médica que proporciona información, basada en el contraste de imagen conseguido por un mecanismo intrínseco a la técnica de imagen (US, MRI, CT).

La imagen de las radiografías se produce gracias a que los rayos X se absorben más en las zonas de mayor densidad, cómo en el caso de los huesos, y en menor medida en los otros (cómo en el caso del aire), de ahí que lleguen a la película menos fotones en la zona donde están los huesos y más en el resto de las zonas de menor densidad, de tal manera que en el procesado se forma una imagen con partes claras y partes oscuras, donde se pueden distinguir los huesos e incluso otros tejidos. Principalmente se usa para información anatómica, pero ciertos compuestos con alto número atómico (Z) se pueden utilizar como agentes de contraste, resultando en una alta resolución espacial en imágenes *in vivo*. Las imágenes con rayos X son planas, en dos dimensiones, por lo que en 1973 se desarrolló la técnica tomografía computerizada (CT o TAC) que consiste en tomar muchísimas imágenes con rayos X desde distintos ángulos. Todas esas imágenes son procesadas y reconstruidas mediante un programa informático, obteniéndose una imagen tridimensional [3].

Cabe destacar que con esta técnica llegan altas dosis al paciente (equivalente a varios años de radioactividad natural) pero es una técnica de imagen ampliamente utilizada por sus grandes ventajas.

IMAGEN POR ULTRASONIDOS (US), ULTRASONOGRAFÍA O ECOGRAFÍA

Reside en las propiedades de ondas de sonido de alta frecuencia cuando viajan a través de los tejidos. Las propiedades de las ondas reflejadas de sonido, como la frecuencia, amplitud y tiempo

de llegada son analizadas y permiten que una imagen 2D pueda ser creada. La ultrasonografía es de bajo coste, no usa radiaciones ionizantes, proporciona una excelente resolución espaciotemporal y se usa de forma extensa en la clínica. A pesar de esto, tiene un pequeño campo de visión y tiene una penetrancia limitada en el tejido [3].

IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA (MRI)

Esta modalidad de imagen se basa en las características de spin y las propiedades magnéticas de ciertos núcleos atómicos. El núcleo primario usado como contraste son los protones presentes abundantemente en las moléculas de agua que se encuentran en el cuerpo. Los protones en diferentes entornos de tejidos (por ejemplo, tejido adiposo y sangre) tienen diferentes tiempos de relajación, lo que permite el contraste en la imagen. El contraste de imagen en MRI se genera debido a la diferencia en los tiempos de relajación longitudinal (T1) y transversal (T2) de cada tejido. Un ejemplo de agentes de contraste son las nanopartículas que contienen metales paramagnéticos (cómo el Gd^{3+} y el $Mn^{2+/3+}$), capaces de modular los tiempos de relajación de los núcleos activos por MRI. Como modalidad, la MRI no requiere radiación ionizante [3].

IMAGEN NUCLEAR O POR RADIONÚCLIDOS

Se refiere a dos técnicas de imagen principalmente: tomografía computerizada por emisión de un fotón único (SPECT) y tomografía por emisión de positrones (PET). Ambas técnicas se basan en la detección de nucleidos radioactivos (radionucleidos), permitiendo una imagen no-invasiva in vivo debido a las emisiones radioactivas del radionucleido, usando el escáner apropiado. Ambas técnicas difieren en el método de detección.

Los radionucleidos utilizados normalmente están unidos a un fármaco de interés médico, formando los llamados radiofármacos. Una vez dentro del organismo se distribuyen por diversos órganos dependiendo del tipo de radiofármaco empleado. La radiofarmacia es la especialidad sanitaria que estudia los aspectos farmacéuticos, químicos, bioquímicos, biológicos y físicos de los radiofármacos. Asimismo, esta aplica dichos conocimientos en los procesos de diseño, producción, preparación, control de calidad y dispensación de los radiofármacos, tanto en su vertiente asistencial – diagnóstica y terapéutica – como en investigación. Cabe señalar que cuando se realizan estudios *in vivo* con moléculas marcadas la biodistribución de los radionúclidos libres o sin quelar es un factor clave a estudiar. Aunque esto se subestima a menudo, la pérdida de consideración de este aspecto puede llevar a malinterpretar la señal en la imagen. En el caso contrario, el conocimiento de la biodistribución del radionucleido puede también añadir información para seleccionar de forma apropiada el radionúclido dependiendo de la aplicación final, para evitar en lo posible la superposición entre las señales del radionúclido libre y del material marcado. A continuación, se detallan las dos técnicas de Imagen Molecular más utilizadas actualmente.

Gammaografía - Tomografía Computerizada por Emisión de Fotón Único (SPECT)

Así como en el CT se obtienen imágenes utilizando rayos X producidos de una fuente exterior, en este caso se inyecta al paciente un producto radiactivo, marcado con un emisor gamma. Cuando se ha repartido este radiofármaco por los órganos de interés, la radiación que sale del cuerpo de la

persona es examinada con un detector denominado gammacámara. Esta técnica se llama gammagrafía y el radionucleido más usado es el tecnecio metaestable (^{99m}Tc). Esta técnica también es plana y por ello se desarrollaron otras técnicas para obtener imágenes tridimensionales con radiación gamma. Una de ellas es la Tomografía Computarizada por Emisión del Fotón Único (SPECT) que se basa en una o más gammacámaras. Esta técnica se lleva a cabo rotando la cámara alrededor del sujeto o paciente para capturar las emisiones gamma en 3D. Para determinar el origen de los fotones se utilizan colimadores que preferencialmente permiten detectar rayos paralelos.

Tomografía por Emisión de Positrones (PET)

Otra de las técnicas de Medicina Nuclear es la tomografía por emisión de positrones (PET) que utiliza isótopos radiactivos emisores beta positivos de vida corta (minutos u horas). Las partículas beta positiva son positrones que en el cuerpo apenas recorren uno o dos milímetros, se encuentran con un electrón, su antipartícula, y se produce la aniquilación de ambas, proceso que genera la emisión de los dos fotones con la misma energía (511 keV cada uno) y misma dirección, pero sentidos opuestos. El equipo PET consta de un anillo de detectores en cuyo centro se sitúa el paciente, al que se le ha inyectado el producto radiactivo. Los dos fotones que se producen en cada una de las aniquilaciones son detectados en coincidencia, es decir, impactan en los detectores situados diametralmente opuestos. La línea que une ambos detectores que han registrado cada uno de los eventos permite localizar el punto donde se ha producido la aniquilación. Como el producto, radiofármaco, está diseñado para que se fije en los órganos que se pretenden estudiar, mediante un proceso informático se obtiene una imagen tridimensional. El radionucleido más usado en esta técnica es el Fluor-18 (^{18}F) unido a una molécula de glucosa (^{18}F -FDG), y se utiliza como radiotrazador para el diagnóstico y estadiaje de gran variedad de tumores [4].

TERAPIA CON RADIONÚCLIDOS

Dentro de la medicina nuclear, las propiedades de decaimiento de ciertos radionúclidos permiten su uso para terapia. Estos radionúclidos emiten partículas alfa y beta que son capaces de depositar una cantidad sustancial de energía y aumentar el daño en tejidos. Estos radionúclidos terapéuticos pueden ser incorporados en altas concentraciones en nanomateriales para aumentar su eficiencia. A continuación, se presentan algunas de estas técnicas según la emisión del radionúclido utilizado.

Radiación de partículas alfa

Una partícula alfa es un núcleo de helio (^4He), con una carga emitida +2 por algunos radionúclidos, produciendo el decaimiento de estos. Se consideran emisiones de alta transferencia lineal de energía (LET), por lo que una partícula puede depositar mucha de su energía en una distancia corta, produciendo mucho daño celular. La diana primaria molecular de la radioterapia con partículas alfa es el DNA del interior del núcleo celular, causando roturas de doble cadena.

Radiación de partículas beta

Una partícula beta (β^-) es un electrón de alta energía emitido de un radionúclido en decaimiento. Las partículas β^- tienen una baja LET, resultando en daño en un mayor recorrido de la partícula. Esto puede resultar en el daño de tejido sano circundante al tejido tumoral.

Radiación de electrones Auger

Son electrones que salen de núcleos radiactivos debido al efecto Auger. Durante el decaimiento radioactivo puede quedar una vacante en un orbital de electrones cercano al núcleo, la cual se llena con un electrón de la órbita externa. La diferencia de energía de esta transición se transfiere a otro electrón que es finalmente expulsado del átomo. Este es el que se conoce como electrón Auger. Tiene un rango de partícula pequeño, pero una alta LET e idealmente tiene que ser llevado intracelularmente al núcleo para maximizar su actividad citotóxica provocando roturas de doble hebra del ADN. A pesar de esto, los electrones Auger pueden también inducir muerte celular dañando la membrana celular, así como generando ROS.

TERAGNOSIS

Aparte del uso individual de radionúclidos para imagen y terapia, combinaciones de radioisótopos pueden ser usadas como pares para teranóstica, para imagen y terapia a la vez. Estas combinaciones están formadas habitualmente por dos radioisótopos del mismo elemento químico, uno con la apropiada propiedad radiofísica para general una señal PET o SPECT, y otro isótopo con propiedades terapéuticas adecuadas. Esta es una aproximación interesante, ya que ambos isótopos son radioisótopos del mismo elemento, por lo que un elemento químico es el que se usa permitiendo ambas técnicas. El primer ejemplo de teranóstica se describió en 1993 por Herzog donde el par $^{86}\text{Y}/^{90}\text{Y}$ fue estudiado y evaluado en un paciente con metástasis ósea, viendo su farmacocinética y las propiedades terapéuticas. Desde ese momento, diferentes pares se han propuesto aumentando las oportunidades en medicina personalizada. No obstante, también existen radioisótopos donde el mismo radionúclido puede usarse tanto para terapia como para diagnóstico, caso del ^{177}Lu , el cual emite partículas beta (terapia) y rayos gamma (SPECT).

PRODUCCIÓN DE RADIONUCLEIDOS

Tradicionalmente, la producción de radionúclidos para imagen médica y terapia ha estado asociada con costosas instalaciones y procesos largos en el tiempo. Actualmente, la optimización de los procesos de producción y la modernización de las tecnologías de producción ha facilitado el aumento del uso de equipos clínicos y preclínicos. Los radiofármacos que se utilizan en estas técnicas se pueden preparar de distintas formas que se detallan a continuación [2].

FISIÓN Y ACTIVACIÓN POR NEUTRONES

Ambos métodos se llevan a cabo por el bombardeo de un núcleo estable (diana) con un neutrón, y requiere de energías solo disponibles en reactores nucleares. Uno de los radionúclidos más importantes aplicados a la medicina nuclear y producido por fisión es el ^{99}Mo con la aplicación más importante siendo el padre en los generadores de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. En el caso de la activación por neutrones, los neutrones generados durante el proceso de fisión son dirigidos a un blanco con un núclido estable, dando como producto un núcleo excitado. Este núcleo excitado experimenta una desexcitación a un estado menor emitiendo un fotón prompt-gamma, produciendo un isótopo radioactivo del mismo elemento.

ACELERADOR DE PARTÍCULAS (CICLOTRÓN)

El ciclotrón es un acelerador de partículas, en el cual las partículas (protones, deuterones, Tritón (gas de tritio o ^3He) o partículas α) generadas por una fuente de iones a un alto voltaje, son aceleradas siguiendo una trayectoria espiral y dirigidas hacia una diana o blanco, de tal manera que esas partículas una vez aceleradas, se hacen chocar con un material denominado blanco. Los radionúclidos producidos por ciclotrón son deficientes en neutrones y decaen por captura electrónica o β^+ . Por ello, los ciclotrones se usan como método para la producción de radionúclidos emisores de positrones, cómo, por ejemplo, para la producción del radiofármaco ^{18}F -FDG.

GENERADOR

Por último, los radionucleidos se pueden generar mediante un generador isotópico, que por su sencillez y reducido tamaño son muy asequibles. Sin duda, el generador más empleado a nivel mundial es el de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ya que muchas moléculas utilizadas para diagnóstico se pueden marcar con $^{99\text{m}}\text{Tc}$, emisor gamma que se utiliza de forma convencional tanto en gammagrafía como en SPECT. En lo referente a la PET, el ^{68}Ga (67,7 minutos de periodo de semidesintegración), es un emisor positrónico muy útil que puede obtenerse de esta manera, pues es hijo del germanio Ge-68, el cual presenta un periodo de semidesintegración de 270,93 días (generador de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$). Este tipo de sistema contiene una matriz sólida donde el par de radionúclidos padre/hijo están absorbidos. El concepto se basa en la extracción selectiva del radionúclido hijo de la matriz utilizando un método de elución con un solvente. Esta separación se basa en propiedades físicas o químicas de los dos radionúclidos. Además, debido al largo periodo de semidesintegración del radionúclido padre, el generador puede ser eluido repetidamente (después de un tiempo de recuperación) permitiendo una continua fuente de actividad del hijo. Los generadores tienen otras ventajas únicas como la pequeña huella o su construcción y uso simple, evitando costosas instalaciones. Una vez concluido el proceso de elución del generador puede ser necesario un proceso de purificación y, a continuación, el marcaje de la molécula de interés que se va a utilizar en la técnica de imagen.

RADIOTERAPIA

La radioterapia utiliza partículas de alta energía, tales como los rayos gamma, rayos de electrones o de protones o iones, para eliminar o dañar las células cancerosas. Se consigue haciendo incidir la radiación, de forma focalizada, en los órganos a tratar. Para que sea efectiva debe proporcionar altas dosis; pero, además, debe conseguir que la exposición radiológica en las zonas adyacentes sanas sea lo más baja posible. La radioterapia convencional utiliza fotones de alta energía (rayos gamma) que inciden en el tejido dañado. Actualmente, la técnica más moderna para el tratamiento del cáncer es la protonterapia o tratamiento con protones. Es una de las modalidades de hadronterapia, es decir, terapias en las que utilizan partículas subatómicas denominadas hadrones, que son concretamente protones, neutrones o incluso iones. Estas partículas provienen de un acelerador y se utilizan haces de protones de diferente energía para conformar la dosis en el paciente. Es más segura que las que usan radiaciones gamma, pues uno de los problemas de estas es que no sólo impactan en las células tumorales sino en las células de tejidos adyacentes y todas

las que atraviesa el haz de radiación hasta llegar el tumor. En cambio, los protones pueden penetrar en el organismo y ceder casi toda su energía a una determinada profundidad, evitando de esta manera que se irradien las células sanas. La dosis de radiación que reciben los tejidos es en función de la profundidad que alcanzan los protones en ellos. Según va penetrando la dosis se mantiene en un valor bajo hasta alcanzar de repente un valor máximo que después decae estrepitosamente, es lo que se conoce como pico de Bragg y la profundidad a la que se forma depende de la energía que lleven los protones (Figura 6). Además, los protones tienen mayor efectividad biológica que la radiación gamma, es decir, hacen más daño biológico, por lo que se necesita menos protones que fotones para acabar con un determinado tumor. Esto viene dado por lo que se conoce como transferencia lineal de energía (LET), teniendo los protones una alta LET, producen más daño biológico directo que otras radiaciones con baja LET como los fotones [2, 5].

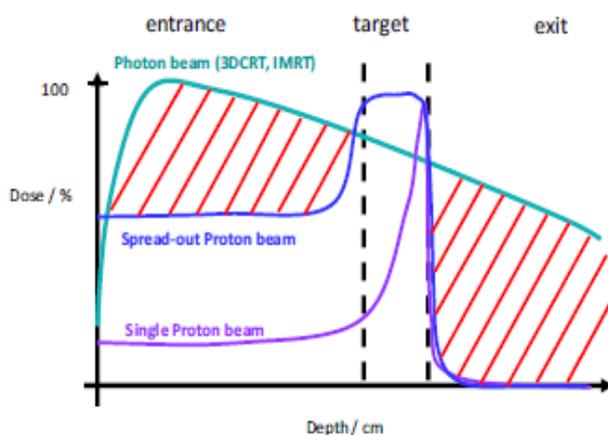


Figura 6. Curva de deposición de dosis de fotones y protones. Las líneas en rojo representan la dosis innecesaria dada por los fotones y que puede ser evitada con el uso de protones [5].

INVESTIGACIÓN MÉDICA

Además de las aplicaciones anteriormente nombradas, una parte importante de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes es su uso en procesos de investigación biológica. En este sentido, la Unidad de Aplicaciones Médicas de las Radiaciones Ionizantes, adscrita al Departamento de Tecnología y dirigida por el Dr. Miguel Ángel Morcillo Alonso en el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de Madrid es un ejemplo de los distintos campos de investigación en los que se pueden usar las radiaciones para la investigación preclínica de potenciales agentes terapéuticos y diagnósticos dentro del área de la biomedicina. A continuación, se detallan las actividades realizadas en estos campos dentro de dicha Unidad.

PRODUCCIÓN DE RADIOISÓTOPOS Y SÍNTESIS DE RADIOTRAZADORES

Cómo ya se ha visto anteriormente, la producción de radioisótopos es un proceso previo necesario para el uso en Medicina Nuclear, tanto para diagnóstico por imagen como para terapia. La radiofarmacia en este sentido incluye tanto la producción de radionucleidos PET como la generación de moléculas marcadas que serán utilizadas como sondas de imagen PET. En la Unidad se investiga la producción de radionúclidos mediante un ciclotrón superconductor enfocado fundamentalmente a la producción de ^{11}C y ^{18}F en monodosis para imagen molecular que se encuentra en su fase final

de desarrollo por parte del grupo de aceleradores del CIEMAT, y también mediante generadores de radionúclidos. La Unidad es pionera en España en el desarrollo de un generador de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ (Figura 7.a) y su uso que permite la producción de ^{68}Ga , emisor positrónico, de forma rápida y eficiente [6,7]. Este está formado por una columna de nano-óxido de estaño (Figura 7.b) por la que se eluye el radioisótopo utilizando una solución de HCl. Por otra parte, actualmente se encuentra trabajando en el desarrollo de un generador de $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$. El objetivo principal por tanto será el desarrollo de trazadores moleculares específicos (Figura 8) y con gran sensibilidad, la optimización de los procedimientos de síntesis y el control de calidad de dichos productos para obtener sondas con la mayor actividad específica posible.

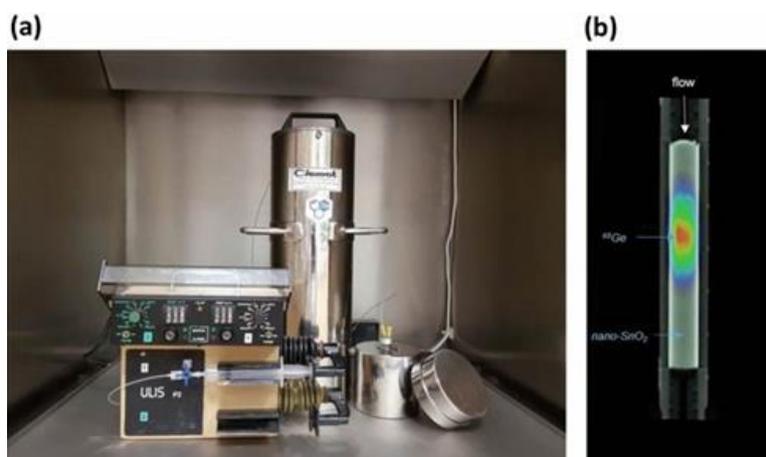


Figura 7. (a) Generador de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ (b) imagen PET/CT de la columna de dicho generador con la acumulación de actividad en rojo [6].

Además, la realización de estudios de saturación, unión competitiva e internalización de radioligandos en líneas celulares, así como, la determinación *in vitro* de cualquier actividad biológica de interés en presencia del compuesto marcado (ELISA, ensayos fluorimétricos para determinar actividad enzimática y otros) son necesarios para comprobar que, tras el marcaje, la sonda no pierde la afinidad por su diana. Estos estudios permiten evaluar si la molécula marcada es viable para realizar posteriormente estudios de imagen *in vivo*.

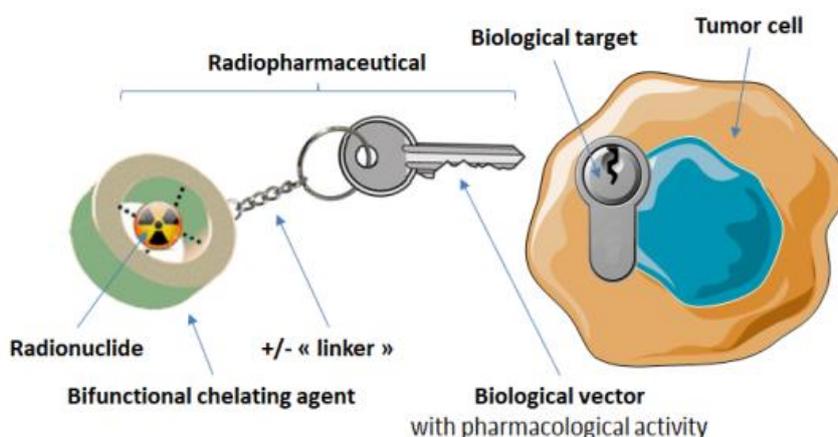


Figura 8. Esquema de un radiofármaco para imagen y terapia del cáncer en donde se representa la célula tumoral con la sonda (biological vector) unida a un radionúclido formando el radiofármaco específico de la molécula diana (biological target) [8].

ESTUDIOS PRECLÍNICOS DE AGENTES DE DIAGNÓSTICO Y/O TERAPÉUTICOS MEDIANTE IMAGEN MOLECULAR PET/CT

La imagen molecular en los últimos años se ha vuelto crítica en la investigación biomédica preclínica ya que permite la evaluación no invasiva de procesos biológicos y bioquímicos *in vivo* en pequeños animales de laboratorio. Aunque los primeros equipos de imagen PET fueron utilizados para aplicaciones en humanos, los avances tecnológicos han permitido implementar en estos equipos mejoras en aspectos de su hardware, firmware y software para adaptarlos para el uso en pequeños animales de experimentación, obteniéndose equipos microPET/CT con un buen compromiso entre resolución y sensibilidad (Figura 9, Figura 10 y Figura 11). La Imagen Molecular abre numerosas posibilidades para implementar técnicas de diagnóstico, diseñar nuevas terapias, validar su aplicación y optimizar el pronóstico, por lo que se ha convertido en un campo clave en la medicina personalizada de precisión. Estas técnicas establecen un puente esencial para trasladar los resultados obtenidos en modelos animales de experimentación (estudios preclínicos) a la práctica clínica, constituyendo una herramienta fundamental en varias de las líneas de investigación biomédica en las que se trabaja en el CIEMAT.

La imagen PET en preclínica permite la detección y caracterización temprana de la enfermedad (previa a un daño irreversible), el estudio de distintas patologías en modelos animales de enfermedades humanas, la evaluación preclínica de nuevos fármacos y es ideal para implementar el concepto de teragnosis.

Uno de los grandes retos y aplicaciones de la PET es la monitorización de la respuesta inmune *in vivo*, ya que el sistema inmune se encuentra implicado en la evolución de múltiples enfermedades de distinta índole como son el cáncer y las enfermedades autoinmunes. Recientemente la inmunoterapia ha mostrado resultados prometedores en el tratamiento de este tipo de enfermedades, pero no todos los pacientes responden a este tipo de terapia, y dado que puede producir efectos secundarios adversos considerables y que, además, se trata un tipo de tratamiento con un coste muy elevado, cada vez hay una mayor demanda de herramientas que permitan un uso de la inmunoterapia de un modo más efectivo, maximizando las probabilidades de respuesta del paciente. Por tanto, sería de gran utilidad disponer de nuevos trazadores que nos permitiesen mediante procesos no invasivos estudiar el estatus inmune del paciente con el fin de tomar decisiones terapéuticas, y de este modo, ir hacia una medicina personalizada. La imagen PET equivaldría a realizar una biopsia virtual (biopsia *in vivo*) que indique la presencia y estado funcional de determinados tipos celulares implicados en la respuesta inmune. Por el momento los radiotrazadores para imagen en inmuno-oncología son escasos y la introducción de nuevos trazadores va muy por detrás del desarrollo de la inmunoterapia del cáncer.

Los principales tipos de moléculas marcadas que se utilizan en la Unidad en imagen PET son péptidos, anticuerpos, fragmentos de anticuerpos (Fab, scFv y *nanobodies*) y nanopartículas. Estos trazadores pueden usarse para el diagnóstico y/o el tratamiento.



Figura 9. Imagen del laboratorio AAA. De izquierda a derecha: sistema de anestesia, equipo microPET/CT, cabina de flujo laminar con pantalla de cristal plomado, pantalla plomada para extracción de dosis y armario y papelera blindados.

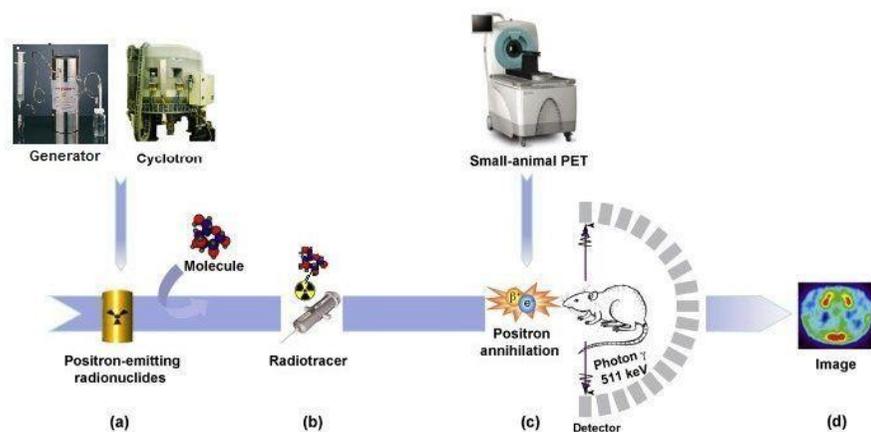


Figura 10. Representación del proceso de obtención de la imagen PET. (a) Obtención de radionúclidos, (b) Radiosíntesis de la molécula de interés, (c) Administración de la molécula y detección de los dos rayos gamma emitidos, (d) Imagen PET tridimensional obtenida que muestra la captación tisular del radiotrazador. (Adaptada de [9]).

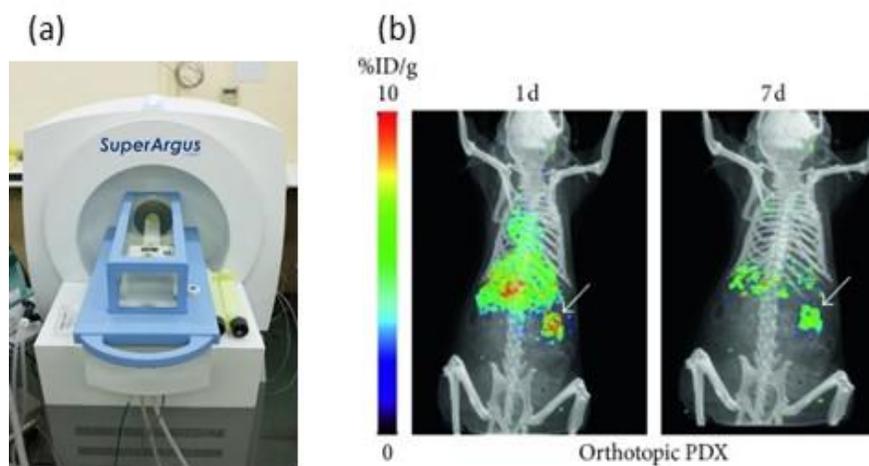


Figura 11. (a) Equipo microPET/CT SuperArgus (Sedecal). (b) Ejemplo de imágenes a distintos días post-administración de la sonda ^{89}Zr -DFO-LEM2/15 obtenidas con el equipo (a) de un ratón con un tumor ortotópico de páncreas, donde se observa la acumulación específica de la sonda marcada radiactivamente con una flecha [10].

La Unidad de Aplicaciones Médicas de las Radiaciones Ionizantes es pionera en España en el marcaje de diferentes moléculas con el emisor PET ^{68}Ga , así como, en la utilización del radioisótopo PET ^{89}Zr en el diagnóstico por imagen denominado Inmuno-Tomografía por Emisión de Positrones (Inmuno-PET) en la cual se combina la alta sensibilidad y capacidad cuantitativa de la PET con la especificidad y selectividad de los anticuerpos monoclonales frente a una proteína de expresión exclusiva o mayoritaria en la superficie de la célula tumoral (Figura 11.b). Esta combinación hace que el Inmuno-PET sea comparable a realizar una inmunohistoquímica *in vivo*, integrada, cuantificable, en tres dimensiones y de cuerpo completo permitiendo el diagnóstico y monitorización de los pacientes a lo largo del tiempo de una forma no invasiva [10,11,12].

Por otra parte, las nanopartículas (NP) como agentes de imagen presentan una serie de ventajas que han atraído un interés enorme en los últimos años y además, existe gran interés por parte de varios grupos españoles de obtener NP marcadas con ^{68}Ga , ^{44}Sc ó ^{89}Zr .

El laboratorio ofrece colaboración en diferentes proyectos tanto a grupos internos como a grupos externos. Además, se realizan estudios farmacocinéticos y de biodistribución *ex vivo* de la forma tradicional, y se emplea la imagen molecular PET/CT como sistema para realizar estos mismos estudios pero de manera *in vivo*, facilitando el estudio de distintas patologías moleculares en modelos animales de enfermedades humanas y la evaluación preclínica de numerosas terapias, con la colaboración con empresas biofarmacéuticas y diferentes grupos de centros/fundaciones/universidades.

También se utiliza la imagen molecular PET/CT como sistema para realizar estudios de expresión génica *in vivo*. Se está tratando de desarrollar un nuevo sistema de imagen de genes reporteros más universal que los que existen en la actualidad, para visualizar en tiempo real cambios en la expresión génica *in vivo* mediante PET, basado en la expresión del gen de la beta-lactamasa bacteriana mutante que une de forma irreversible y con mucha afinidad antibióticos beta-lactámicos (ampicilina). Este es un proyecto de alto valor añadido que permitiría generar animales transgénicos para realizar estudios preclínicos de eficacia de un determinado tratamiento, evaluando cambios en la expresión génica asociados a determinadas enfermedades.

Además, se evalúan estrategias de teragnosis mediante *pretargeting* en el marco de dos proyectos financiados por la Fundación BBVA y la Acción Estratégica en Salud 2020 (Instituto de Salud Carlos III), usando un fragmento de anticuerpo frente a una metaloproteasa que se sobreexpresa en distintos tipos de tumores (MMP-14) y un par de radioligandos, uno marcado con ^{68}Ga para diagnóstico y el otro con ^{177}Lu para terapia, mediante química biortogonal click *in vivo* en un modelo murino de cáncer de pulmón metastásico. De este modo se lograría evitar la irradiación de distintos órganos mientras el anticuerpo circula en sangre, ya que el radionucleido se introduce en el organismo una vez el anticuerpo se ha unido de forma específica a su diana en las células tumorales.

En colaboración con la Facultad de Psicología de la UNED, también se llevan a cabo estudios de neuroimagen para comprobar los efectos del consumo de diversas sustancias estupefacientes (THC, opioides, cocaína...) en los patrones de actividad cerebral. Para ellos nos servimos del radiofármaco [^{18}F]-FDG (18-Fluorodesoxiglucosa), el cual nos permite estimar la actividad cerebral por su relación

directa con el consumo de glucosa, para luego, por medio del uso de regiones de interés (ROI) en el que segmentamos el cerebro en macrorregiones o mapas de estadística paramétrica (SPM), hacemos estudios estadísticos buscando áreas que muestren una diferencia significativa en el consumo del radiofármaco entre los grupos de estudio [13]. Dentro del campo de la neuroimagen también se realizan estudios usando otros radiofármacos como el [^{18}F]-Florbetaben, el cual permite detectar las placas beta-amieloides que se forman en el cerebro y son indicativas de Alzheimer.

Por último, se está realizando actualmente la implementación en el equipo Super Argus PET/CT (Sedecal) de la técnica multiplexed PET (mPET) o imagen PET dual que permite distinguir entre las emisiones de emisores positrónicos puros (^{18}F , ^{68}Ga y ^{89}Zr) y otros emisores positrónicos que además, emiten un tercer fotón (^{44}Sc , y ^{124}I). Esto nos permitiría obtener imágenes PET de diferentes radiotrazadores administrados y adquiridos simultáneamente, lo que nos proporcionaría información complementaria importante en una única prueba. Esto se realiza con la colaboración del grupo de Física Nuclear de la UCM, que desarrolló esta tecnología en el marco del programa Madrid-MIT m+Visión. En la práctica clínica, esta información complementaria no se obtiene actualmente, ya que requeriría adquisiciones costosas separadas y visitas repetidas al hospital. Obtener al menos dos de estos parámetros en la misma sesión de exploración sería muy beneficioso para el diagnóstico correcto y la selección de tratamiento adecuada, sin causar malestar añadido al paciente.

Difundir el conocimiento entre la comunidad científica sobre las posibilidades que ofrece este tipo de tecnología contribuye de decisiva a la evolución y mejora del bienestar animal, ya que desde la perspectiva de las 3Rs, que establecen los estándares aceptados para investigar con animales (reemplazo, reducción y refinamiento), las técnicas de imagen molecular se han valorado como técnicas de reducción y refinamiento porque además de ser menor la cantidad de animales necesarios para un estudio en particular, no son invasivas, ya que a diferencia de las técnicas clásicas, nos permiten realizar estudios longitudinales en un mismo animal, reduciéndose la variabilidad biológica interindividual en cada experimento. Además, los estudios en animales vivos, a diferencia de los ensayos *in vitro* y *ex vivo* incorporan todos los factores fisiológicos presentes *in vivo*.

INSTRUMENTACIÓN Y SIMULACIÓN PARA MEDICINA NUCLEAR Y RADIOTERAPIA

El proceso de un tratamiento de radioterapia empieza con el diagnóstico, normalmente por imagen. Con esta imagen se realiza un posicionamiento y una valoración y planificación para elegir de forma adecuada el tipo de radioterapia idónea y la pauta de tratamiento. Al aplicar el tratamiento además es necesaria la simulación del tratamiento por métodos informáticos que permiten diseñar el tratamiento de forma personalizada para cada paciente y finalmente, realizar controles de calidad para asegurarse de que todo ha resultado de la forma prevista.

En la Unidad de Aplicaciones Médicas de las Radiaciones Ionizantes se está desarrollando una herramienta basada en los códigos de simulación Monte Carlo (GAMOS/Geant4) para mejorar la planificación de los tratamientos que se están dando en el centro de protonterapia de la Clínica Universidad de Navarra (CUN). La protonterapia ha demostrado que es el tipo de radioterapia que

ofrece mejores resultados, al permitir una irradiación más eficaz del tumor y disminuir la irradiación a tejidos sanos. Por otro lado, las técnicas de simulación basadas en Monte Carlo han demostrado ser las más precisas para calcular la dosis que se va a dar a los pacientes. Con este proyecto se está desarrollando una herramienta adaptada a las necesidades de la clínica, que incluye un interfaz gráfico para permitir su uso diario por el personal clínico. Además, dicha herramienta ofrecerá la novedad de poder calcular el daño asociado a efectos biológicos utilizando los algoritmos más avanzados.

RADIOBIOLOGÍA

La radioterapia es un tratamiento eficaz y ampliamente utilizado para lograr el control local de los tumores sólidos. Como se ha comentado anteriormente, la radioterapia convencional utiliza rayos X generados por aceleradores de electrones (LINAC), mientras que la hadronterapia (terapia con partículas cargadas de alta energía) utiliza protones e iones pesados producidos por ciclotrones o sincrotrones.

Las propiedades únicas de los protones permiten el tratamiento de áreas específicas evitando los tejidos circundantes debido a la deposición de dosis en profundidad y los diferentes valores de LET a lo largo de esta deposición. Esto permite administrar dosis más altas en el tumor al tiempo que se mantienen bajas las dosis en las estructuras críticas adyacentes, lo que adquiere especial relevancia en el caso de los largos supervivientes, especialmente en la población pediátrica. Sin embargo, se necesita un mejor conocimiento de su dosimetría y de los efectos radiobiológicos de los protones para poder aprovechar al máximo las oportunidades que puede ofrecer esta terapia.

La radiación induce una respuesta biológica que dependerá de varios parámetros físicos y biológicos, como son el tipo de radiación y las características del haz, la transferencia lineal de Energía (LET), la dosis, el fraccionamiento de la dosis, el tipo de tejido y el efecto biológico estudiado. En el caso de protones o iones más pesados, su alta LET en comparación con fotones o electrones hace que sean radiaciones más dañinas, es decir, que presenten mayor Eficacia Biológica Relativa (EBR). La EBR permite comparar las dosis necesarias de dos tipos de radiación que producen un mismo efecto biológico y se calcula dividiendo dosis de una radiación de referencia (Rayos X) entre la radiación objeto de estudio (protones). Las características físicas de la radiación determinan su interacción con la materia y por tanto el daño que son capaces de causar a los tejidos biológicos. En la práctica clínica, actualmente, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas (ICRU) recomienda la utilización de una EBR constante de 1,1 para protonterapia a lo largo de todo el volumen irradiado independientemente del tipo de tejido, la dosis, la tasa de dosis, las propiedades físicas y la LET del haz de protones, basándose en los datos disponibles de estudios in vitro e in vivo de los efectos biológicos de los protones realizados en los inicios de la protonterapia en el centro del Pico de Bragg extendido a 2 Gy y haciendo la media al estudiar distintos efectos biológicos. Esta premisa está siendo cuestionada, ya que distintos estudios muestran que la RBE es variable (0,9-1,7) en el ancho del pico de Bragg y además depende del tipo de tumor irradiado. La RBE, en haces de protones, aumenta a medida que los protones van atravesando el tejido biológico y que se va produciendo un aumento de la LET, cosa que no ocurre en la radioterapia convencional con fotones (EBR constante a lo largo del recorrido). La EBR de los protones es mayor en la parte distal del pico

de Bragg donde se produce un aumento de la LET, lo que podría dar lugar a una irradiación excesiva de los órganos críticos adyacentes.

La incorporación de una EBR variable en el proceso de planificación del tratamiento debería, en principio, conducir a una diferencia aún mayor entre las dosis que reciba el tejido tumoral y los tejidos sanos adyacentes. Es, por tanto, necesario un estudio más exhaustivo de los efectos radiobiológicos de los protones con el fin de mejorar la precisión de los tratamientos en la práctica clínica. Sin embargo, el uso clínico extendido de los haces de protones de forma precisa está obstaculizado por las incertidumbres de la localización de la caída de dosis que ocurre al final del pico de Bragg en el cuerpo del paciente y los diferentes efectos que ocurren por la radiación dependiendo de la línea celular.

Dada la relevancia que va a tener en los próximos años la terapia de protones como tratamiento de radioterapia externo para el cáncer en España por la puesta en marcha de dos centros de protonterapia para tratar pacientes (Quirónsalud y Clínica Universitaria de Navarra, ambos en Madrid), el CIEMAT ha iniciado la línea de I+D sobre aspectos radiobiológicos en la terapia de protones enfocada en varios aspectos.

La verificación *in vivo* de la dosis en el tejido y los efectos de la radiación son dos variables que han de ser estudiadas para reducir las incertidumbres sistemáticas del proceso. Una aproximación prometedora para estudiar el rango de los protones es el uso de nanopartículas como agentes activables por protones que produzcan emisores de positrones que puedan ser detectados por imagen PET o por detección de rayos prompt-gamma (PG). Para ello, en la Unidad se han desarrollado nanopartículas de óxido de Fe dopadas con Zn (IONP@Zn-cit) y se realizan estudios de citotoxicidad *in vitro*, producción de señales PET/PG tras la irradiación con protones y estudio de su biodistribución *in vivo* en modelos animales (Figura 12.a, Figura 12.b y Figura 12.c, respectivamente).

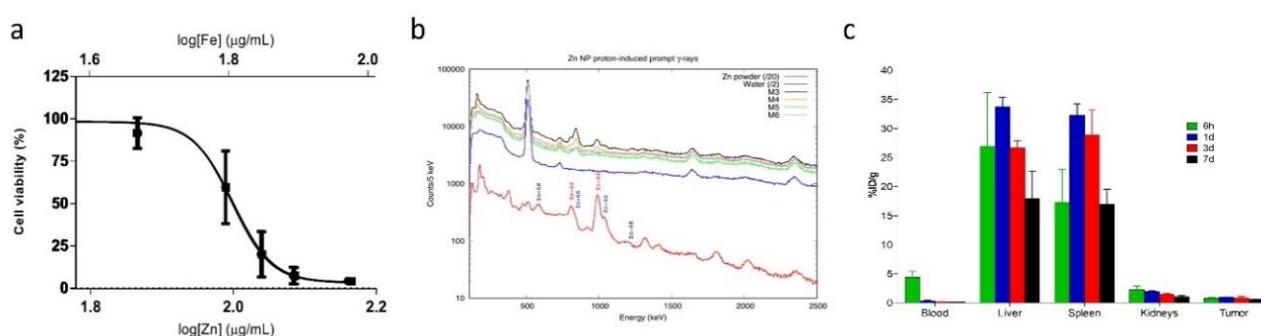


Figura 12. (a) Estudios de citotoxicidad mediante MTT en la línea celular U251 para evaluar la citotoxicidad de las IONP@Zn-cit. (b) Señales PG detectadas tras la irradiación de IONP@Zn-cit con protones. (c) Biodistribución de IONP@Zn-cit tras diferentes días post-administración en un modelo de ratón de U251.

Además, para la evaluación de la EBR con diferentes LET en cultivos celulares, se desarrollan sistemas de irradiación para irradiar con equipos clínicos cultivos celulares, que permiten la deposición de dosis con incertidumbres por debajo del 9 % en los peores casos (Figura 13.a).

Para la medida de la supervivencia en cultivos celulares tras la irradiación con protones y fotones de bajas y altas energías para determinar el efecto de la radiación en distintas líneas celulares se realizan cultivos en placas de 6 y 96 pocillos (Figura 14). Tras la irradiación, en el caso de las placas de 6 pocillos se realiza el conteo de colonias sembradas (estudio de clonogenicidad) y en el caso de las de 96 pocillos se realiza la disolución de la tinción con metanol y su posterior medida de absorbancia para evaluar la supervivencia de las células obteniendo resultados comparables por ambos métodos (Figura 13.b).

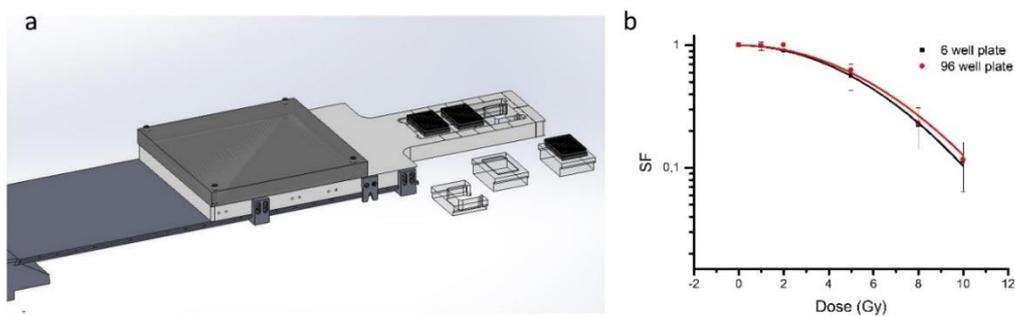


Figura 13. (a) Sistema para el soporte de la irradiación con protones en un haz clínico usando diferentes grosores de PMMA para obtener diferentes LETs en el plano de las células. (b) Ejemplo de curvas de supervivencia celular obtenidas con dos métodos: con la medida de absorbancia de los cultivos en placas de 96 pocillos y con el conteo de colonias clásico en placas de 6 pocillos.

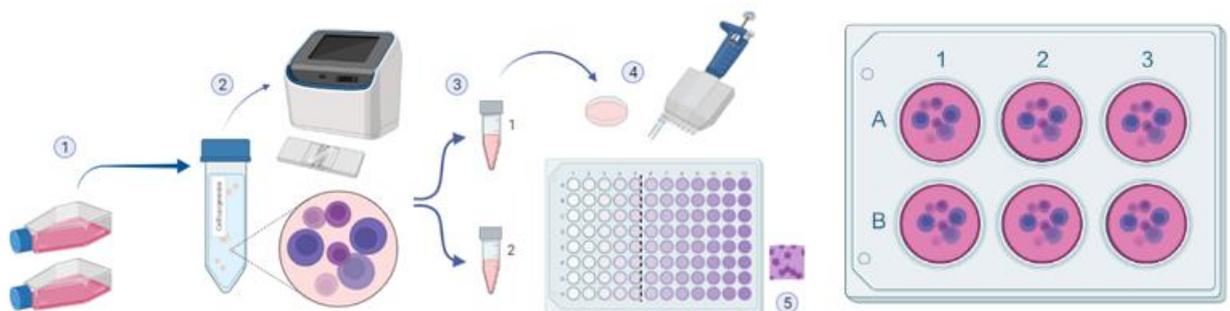


Figura 14. Esquema de la siembra para estudios de viabilidad y clonogenicidad. 1) Levantamiento de las células. 2) Contaje de células levantadas. 3) Diluciones apropiadas para la siembra en los soportes. 4) Siembra de las células en placas de 6 pocillos o de 96 pocillos con distintas cantidades. 5) Fijación y tinción de las células con cristal violeta para su posterior análisis.

En conclusión, mediante diferentes aproximaciones se intenta obtener un mejor conocimiento en el campo de la radiobiología y de la protonterapia, desde la verificación del rango de los protones con nanopartículas hasta los estudios in vitro de los efectos de la LET en diferentes líneas celulares, abriendo diferentes posibilidades al futuro de la investigación en radiobiología.

Dentro del campo de la radioterapia, actualmente también se están profundizando en los estudios de radiobiología para conocer el potencial uso de la terapia de protones en combinación con la inmunoterapia. En los últimos años se está centrando mucho el interés en la posible sinergia de la radioterapia con la inmunoterapia, ya que distintos estudios muestran que la irradiación puede producir una potente respuesta inmunológica que conlleve la reducción del tamaño de los tumores

directamente irradiados, y lo que es más importante, la activación del sistema inmune puede incluso reducir el tamaño de metástasis que se encuentren localizadas fuera del sitio de irradiación (efecto abscopal). Por otro lado, aunque la inmunoterapia ha mostrado resultados esperanzadores, únicamente responden a las terapias disponibles actualmente basadas en la utilización de inhibidores de los puntos de control inmunológico (ICIs) aquellos pacientes con un microambiente tumoral en el que se encuentra activo el sistema inmune. Todavía quedan muchas preguntas sin resolver sobre cómo se deben combinar las diferentes modalidades inmunoterapéuticas con la radioterapia, y cómo realizar la planificación de la radioterapia (en qué momento se administra el tratamiento, dosis, cómo afecta el fraccionamiento de la dosis, etc..) para maximizar la respuesta inmune. Otra pregunta clave es si los hadrones son más efectivos que la radioterapia convencional cuando se utilizan en combinación con inmunoterapia. Las propiedades balísticas de los protones y los iones carbono, que conforman mejor la dosis de radiación en el tumor evitando la irradiación del tejido sano circundante podría evitar la inmunosupresión, haciendo que se produzca una mayor activación del sistema inmune en los tumores. Por tanto, es necesaria la evaluación preclínica de la capacidad de la terapia de protones e iones pesados (respecto a la de fotones) de aumentar la respuesta inmune en el tumor, incluyendo biomarcadores que permitan predecir la respuesta tumoral.

En el laboratorio, se están estudiando mediante ensayos *in vitro* e *in vivo* los eventos inmunogénicos que se producen en el ambiente tumoral tras la irradiación con fotones y protones y en combinación o no con inmunoterapia, en concreto con el anticuerpo frente a PD-L1 (Figura 15), uno de los puntos de control que se utiliza actualmente en clínica para evitar el bloqueo del sistema inmune que se realiza por las células tumorales para que este no actúe y haga frente a la enfermedad. Esto se realiza en modelos animales con diferentes características inmunogénicas y de radiosensibilidad mediante citometría de flujo de sangre periférica y tejido tumoral y mediante análisis hematológico de la sangre periférica tras el tratamiento de inmunoterapia para evaluar las poblaciones del sistema inmune que se ven afectadas (monocitos, neutrófilos, linfocitos, plaquetas, reticulocitos y glóbulos rojos, entre otros).

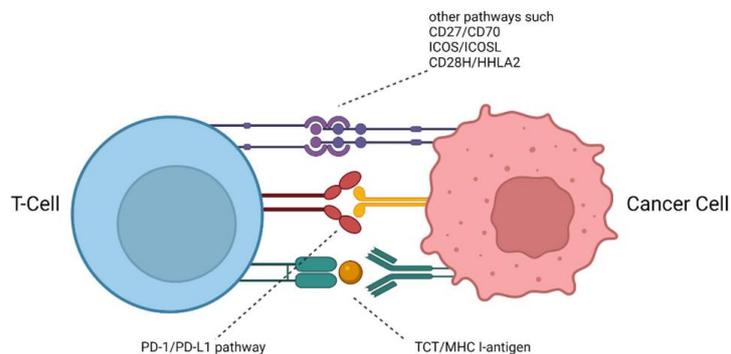


Figura 15 El eje PD-1/PD-L1 en el microambiente tumoral [14].

Finalmente, hacer una mención a una nueva modalidad de radioterapia, la terapia FLASH. Este tipo de terapia es una radioterapia que se aplica con tasas de dosis ultra elevadas a volúmenes de tratamiento, es decir, en un tiempo muy corto, y que puede tener una gran incidencia ya que ofrece la ventaja de una reducción notable de la radiotoxicidad sobre el tejido sano adyacente, en

comparación con la radioterapia convencional, mientras que mantiene la misma efectividad frente al tumor. Con este fin la Unidad dispondrá de un acelerador lineal de electrones para estudiar la radioterapia FLASH en diferentes modelos animales de cáncer, tales como el glioblastoma y el cáncer de mama.

CONCLUSIONES

La radiactividad está presente en todos los ámbitos de la vida diaria y, a pesar de su efecto nocivo, puede aprovecharse. Para ello, es necesario un gran conocimiento de esta, llevando a cabo todos los controles y trabajando con la mayor protección y eficiencia posible. En la Unidad de Aplicaciones Médicas de las Radiaciones Ionizantes se realizan estudios preclínicos para poder desarrollar mejoras a niveles de diagnósticos y tratamientos de distintas patologías, así como para conocer el comportamiento de distintos radioisótopos y moléculas de interés biomédico en diferentes condiciones. Esto se conoce como investigación traslacional, siendo el objetivo principal la mejora en la salud y el avance en el conocimiento sobre este campo.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo no habría podido desarrollarse sin la colaboración de toda la Unidad de Aplicaciones Médicas y los proyectos que financian las investigaciones presentadas en el mismo:

- P2022/BMD-7434. Advanced Strategies and new Approaches for Protontherapy (ASAPCM). Comunidad de Madrid.
- CPP2021-008337. Desarrollo preclínico de anticuerpos monoclonales contra IL13RA2 para la terapia del cáncer (CANCERKINE). Ministerio de Ciencia e Innovación.
- 2021I039. Estudio de las diferencias sexuales en vulnerabilidad al consumo compulsivo de alcohol en la edad adulta inducida por la exposición a diferentes concentraciones de cannabinoides en la adolescencia. Ministerio Sanidad.
- PID2019-104558RB-I00. Radiobiología en la terapia de protones. Bases para la combinación de la terapia de protones e inmunoterapia. Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Radioimmunotheragnostics for metastatic lung cancer with pretargeted clickable Ab fragments. Fundación BBVA.
- B2017/BMD-3888. Protontherapy and nuclear techniques for oncology. CAM; Comunidad de Madrid.
- Imaging of triple-negative breast cancer with specific miniaturized antibodies by ImmunoPET (BREIMPET). Fundación BBVA.
- PID2021-127902OC-C21 y PID2021 127902OC-C22 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y “ERDF A way of making Europe”.

- RED2018-102469-T. Red de nanomedicina para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades de alto impacto social: cancer, aterosclerosis y enfermedades infecciosas. Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Radioimmunotheragnostics for metastatic lung cancer with pretargeted clickable Ab fragments. Fundación BBVA.

REFERENCIAS

- [1] Romero, E. Desarrollo de un generador de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$. Aplicaciones del ^{68}Ga en Tomografía por Emisión de Positrones. 2017 Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- [2] Gómez-Perales, J. L. RADIOFARMACIA. 2020. ISBN: 978-84-694-4632-4.
- [3] Desco, M., & Vaquero, J. J. Imagen molecular en medicina. (2007). *cic Network: ciencia y tecnología*. Revista semestral de la Asociación Red de Centros de Investigación Cooperativa del País Vasco, n. 2, oct. 2007, p. 31-35. Doi: <http://hdl.handle.net/10016/13194>
- [4] Peñuelas Sánchez I. Radiofármacos PET. *Rev Esp Med Nucl*. 2001, 20(6):477-498.
- [5] Blanchard, P., Gunn, G. B., Lin, A., Foote, R. L., Lee, N. Y., & Frank, S. J. (2018). Proton Therapy for Head and Neck Cancers. *Seminars in radiation oncology*, 28(1), 53–63. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2017.08.004>
- [6] Romero, E., Martínez, A., Oteo, M., García, A., & Morcillo, M. A. (2016). Preparation of ^{68}Ga -labelled DOTA-peptides using a manual labelling approach for small-animal PET imaging. *Applied radiation and isotopes: including data, instrumentation, and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 107, pp 113–120. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.10.005>
- [7] Romero, E., Martínez, A., Oteo, M., Ibañez, M., Santos, M., & Morcillo, M. Á. (2020). Development and long-term evaluation of a new $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ generator based on nano- SnO_2 for PET imaging. *Scientific Reports*, 10(1). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69659-8>
- [8] Eychenne R., Bouvry C., Bourgeois M., Loyer P., Benoist E., & Lepareur N. (2020). Overview of Radiolabeled Somatostatin Analogs for Cancer Imaging and Therapy. *Molecules*, 25(17):4012. Doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25174012>
- [9] Lancelot S., & Zimmer L. (2010) Small-animal positron emission tomography as a tool for neuropharmacology. *Trends Pharmacol Sci*. 31; 9: 411 – 417. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tips.2010.06.002>
- [10] Morcillo, M. Á., García de Lucas, Á., Oteo, M., Romero, E., Magro, N., Ibañez, M., Martínez, A., Garulet, G., Arroyo, A. G., López-Casas, P. P., Hidalgo, M., Mulero, F., & Martínez-Torrecuadrada, J. (2018). MT1-MMP as a PET Imaging Biomarker for Pancreas Cancer

Management. Contrast media & molecular imaging, 2018, 8382148. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/8382148>

- [11] de Lucas, A. G., Schuhmacher, A. J., Oteo, M., Romero, E., Cámara, J. A., de Martino, A., Arroyo, A. G., Morcillo, M. Á., Squatrito, M., Martínez-Torrecuadrada, J. L., & Mulero, F. (2016). Targeting MT1-MMP as an ImmunoPET-Based Strategy for Imaging Gliomas. PloS one, 11(7), e0158634. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158634>
- [12] Mulero, F., Oteo, M., Garaulet, G., Magro, N., Rebollo, L., Medrano, G., Santiveri, C., Romero, E., Sellek, R. E., Margolles, Y., Campos-Olivas, R., Arroyo, A. G., Fernández, L. A., Morcillo, M. A., & Martínez-Torrecuadrada, J. L. (2022). Development of anti-membrane type 1-matrix metalloproteinase nanobodies as immunoPET probes for triple negative breast cancer imaging. Frontiers in medicine, 9, 1058455. Doi: <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.1058455>
- [13] Capellán, R., Orihuel, J., Marcos, A. et al. (2023). Interaction between maternal immune activation and peripubertal stress in rats: impact on cocaine addiction-like behaviour, morphofunctional brain parameters and striatal transcriptome. Transl Psychiatry, 13, 84 Doi: <https://doi.org/10.1038/s41398-023-02378-6>
- [14] Krutzek F, Kopka K, & Stadlbauer S. (2022). Development of Radiotracers for Imaging of the PD-1/PD-L1 Axis. Pharmaceuticals, 15(6). 747. Doi: <https://doi.org/10.3390/ph15060747>

COMPATIBILIDAD DE MATERIALES ESTRUCTURALES CON EL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

JESÚS CARRERAS MOLINA

jesus.carreras@ciemat.es

RESUMEN

El hidrógeno es un vector energético que ha generado mucho interés en los últimos años ya que, por un lado, permite interactuar con la generación de energía a partir de fuentes renovables (hidrógeno verde) y por otro lado supone un combustible que presenta mejores características que los convencionales reduce mucho los contaminantes emitidos a la atmósfera. El artículo describe la problemática que surge en los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, en concreto los materiales estructurales metálicos, en los que aparecen fenómenos como la fragilización, que pueden llevar a la rotura del material en servicio. Se detallarán también qué tipo de protección se puede utilizar para evitar estos efectos. Recubrimientos con materiales que absorban el hidrógeno, evitando que entre en el material estructural, o incluso la modificación de la microestructura del material son algunos ejemplos de estas medidas, y parte de los trabajos que se están llevando a cabo en la División de Materiales de Interés Energético del CIEMAT.

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la sociedad mundial y la economía lleva asociado un incremento progresivo en la cantidad de energía primaria que demandamos día tras día para cubrir nuestras necesidades así como para propiciar el desarrollo de nuevas tecnologías que nos sean de utilidad. La obtención actual de energía está basada en el uso de hidrocarburos o combustibles fósiles, que poco a poco se agotan y están concentrados o limitados a zonas geográficas determinadas. El uso intensivo que hemos realizado de los combustibles fósiles desde la primera revolución industrial como nuestra principal fuente de energía ha generado un aumento enorme de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera, habiéndose demostrado que esta es una de las causas mayores del calentamiento global. Así pues, la descarbonización del suministro energético mediante la utilización de energías alternativas, limpias y renovables es esencial en el marco de un futuro sostenible [1].

Las energías renovables están jugando un papel fundamental y serán determinantes en la transición hacia un sistema energético sostenible y limpio. Sin embargo, dado que su origen natural implica una intermitencia variable dependiente de las condiciones climáticas diarias, se requiere de adaptaciones técnicas para equilibrar la oferta y la demanda de energía. Para hacer frente a esta variabilidad y amortiguar la intermitencia de las energías renovables, se plantea la necesidad de desarrollar sistemas de almacenamiento y transporte de energía a gran escala [1], [2].

El hidrógeno se presenta como una posible solución a la intermitencia de las fuentes de energía renovables. Es un vector energético, o elemento que nos permite almacenar energía que posteriormente puede ser liberada a voluntad. Se diferencia de una fuente primaria de energía en que, a diferencia de éstas, se trata de un producto manufacturado en el que previamente se ha invertido una cantidad de energía mayor para su elaboración [4]. La idea de almacenar energía procedente de sistemas de aprovechamiento renovables en un vector energético como el hidrógeno

ha generado mucho interés en los últimos años ya que la energía procedente de fuentes renovables podría ser transformada, transportada y almacenada estando disponible para su consumo cuando fuese necesario.

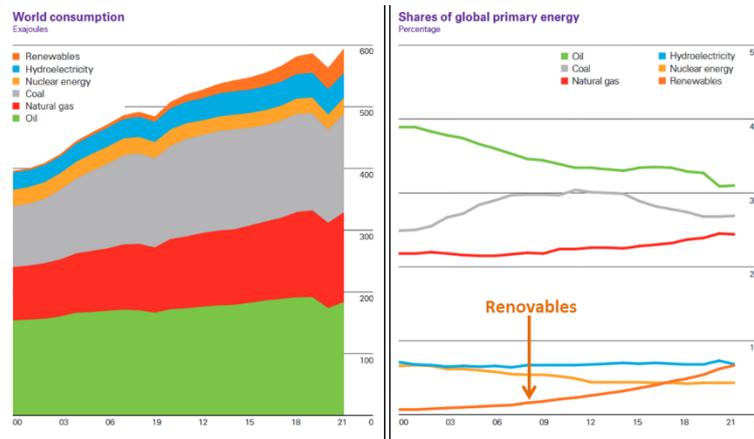


Figura 110. Consumo energético mundial durante los últimos años (izquierda). Tendencias en el consumo energético por tipo de energía durante los últimos años (derecha). Fuente [3].

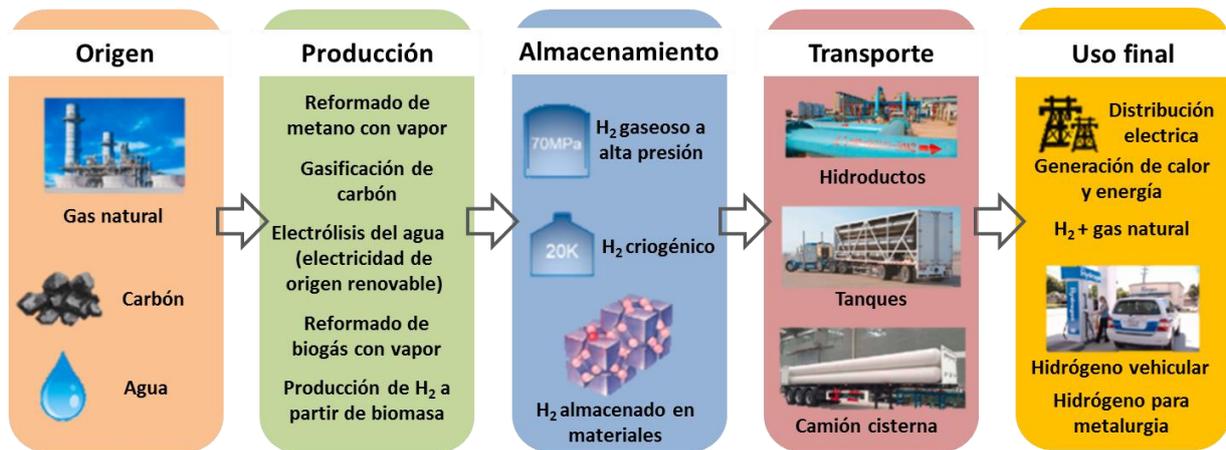


Figura 211. Esquema de la cadena de valor del hidrógeno en la industria. Adaptado de [5].

Además, al contrario de lo que ocurre con otros combustibles, el hidrógeno no se degrada con el tiempo y sus múltiples opciones en cuanto a uso final lo convierten en una herramienta con mucho potencial para implantarse de manera extendida en el nuevo modelo energético.

INFRAESTRUCTURAS PARA EL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

Desde el punto de vista tecnológico, el uso del hidrógeno precisa de una infraestructura similar a la de otros hidrocarburos gaseosos como el metano o el gas natural para un correcto almacenamiento, transporte y aprovechamiento. Todo este proceso debe ser seguro, fiable y económicamente rentable. Con el fin de disfrutar de un transporte y almacenamiento eficaz, sería recomendable el uso de la infraestructura existente y el hecho de que toda la cadena de transporte esté comercialmente probada, para que el hidrógeno llegue así en las mejores condiciones posibles. Vemos que la fiabilidad de la infraestructura y su aplicabilidad industrial están íntimamente relacionadas [4].



Figura 3. Algunos ejemplos de infraestructura para el transporte y aprovechamiento de hidrógeno.

Dentro de la cadena de valor del hidrógeno, cabe mencionar dos de las rutas de transporte y almacenamiento más extendidas que pueden emplearse para su distribución:

- La primera es el manejo de hidrógeno gaseoso. Esta se realiza a temperatura ambiente y alta presión, entre 100 y 500 bar. El método más conocido para almacenar hidrógeno es la bombona o tanque de acero a alta presión, con una presión operativa de 200 bares. Sin embargo, para maximizar la capacidad de almacenamiento, se han diseñado nuevos cilindros de materiales compuestos ligeros que soportan presiones de hasta 800 bares para así mejorar la densidad volumétrica del hidrógeno hasta 36 kg/m³ [6]. Debido a la baja densidad de almacenamiento del gas natural comprimido, el transporte en depósitos sólo es el más económico hasta aproximadamente 200 km de distancia, sin embargo una red de hidrodutos permitiría el transporte en estado gaseoso hasta distancias mucho más largas. Si se precisa de transportes muy largos ya serían necesarios métodos de almacenamiento con mayor densidad energética, como el hidrógeno licuado [7].
- En la licuefacción del hidrógeno, éste se enfría a -253°C y presión de 1 bar para aumentar la cantidad de materia en el mismo volumen y hacer el proceso de transporte de largas distancias mucho más eficiente. Debido a la baja temperatura del hidrógeno líquido (20 K), se han planteado requisitos especiales para la selección de materiales para contenedores de almacenamiento y transporte, incluyendo la adaptabilidad de los materiales en un entorno de hidrógeno líquido, las propiedades mecánicas y las propiedades termofísicas de la temperatura del hidrógeno líquido, que pueden afectar al diseño seguro y fiable de los contenedores de almacenamiento y transporte. Por lo tanto, es de gran importancia práctica dominar sistemáticamente los tipos y propiedades de los materiales criogénicos para el desarrollo de contenedores de almacenamiento y transporte de hidrógeno líquido [7][8].

MATERIALES ESTRUCTURALES PARA EL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

Los materiales estructurales son materiales utilizados o estudiados principalmente por sus propiedades mecánicas, en contraposición a sus características electrónicas, magnéticas, químicas u ópticas [9]. En el transporte y almacenamiento de hidrógeno es empleado principalmente como material estructural el acero, aunque poco a poco se observa el uso de material compuesto en depósitos de fibra de carbono y resinas termoestables [10]. Dentro del mundo del acero, cabe destacar las dos principales variantes empleadas dentro del campo del hidrógeno:

ACEROS AL CARBONO

Se componen principalmente de Fe, un porcentaje variable de C, alrededor del 0,05 % y un pequeño porcentaje de elementos como Mn, Mo, Si entre otros, para obtener un acero con alta resistencia mecánica, que permite que haya sido utilizado tradicionalmente en conducciones de hidrocarburos a alta presión y cuyo uso se ha extendido también al hidrógeno. Es un material relativamente barato y con un uso muy extendido en la industria, sin embargo, sus propiedades a baja temperatura no son buenas, lo que no permite que se use de manera segura en aplicaciones criogénicas. Tampoco ofrece una excelente resistencia a la corrosión [11][12].

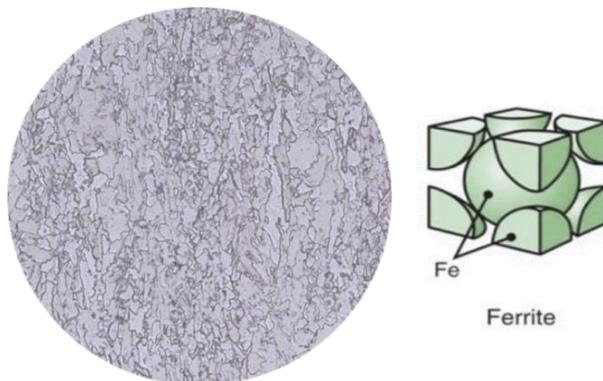


Figura 4. Microestructura de un acero al carbono empleado para transporte de H₂ (izquierda) y un esquema de su estructura cristalina (derecha).

El acero al carbono posee una microestructura ferrítica, en la que los átomos de Fe que conforman el acero se organizan en una estructura cúbica centrada en el cuerpo. La organización de los átomos en un material es determinante en sus propiedades mecánicas y químicas y, como veremos más adelante, también afecta a la interacción de hidrógeno-material.

ACEROS INOXIDABLES

Se componen principalmente de Fe, un pequeño porcentaje variable de C y otros elementos como Mo y Mn. Sin embargo, la causa de que estos aceros no sufran el efecto de la corrosión es la adición de Cr en un porcentaje mínimo del 11 %. Los aceros inoxidables pueden ser ferríticos, teniendo una organización en sus átomos idéntica a la de los aceros al carbono, o pueden ser austeníticos. La microestructura austenítica se consigue añadiendo Ni al acero, lo que promueve que los átomos se

organicen en una estructura cúbica centrada en las caras, más compacta y con unas propiedades mecánicas y químicas distintas a las de la ferrita [13].

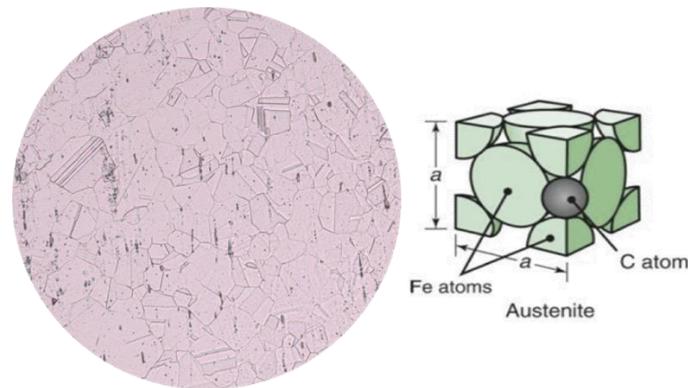


Figura 5. Microestructura de un acero inoxidable austenítico empleado para almacenamiento de H_2 y un esquema de su estructura cristalina.

Muchos de los tanques empleados en almacenamiento de hidrógeno están fabricados de acero inoxidable austenítico. Este material posee buenas propiedades mecánicas y excelente resistencia a la corrosión tanto a temperatura ambiente como a baja temperatura, lo que amplía su campo de utilización desde el hidrógeno comprimido al almacenamiento criogénico de hidrógeno [8].

INTERACCIÓN DEL HIDRÓGENO CON LOS MATERIALES ESTRUCTURALES

El hidrógeno es el elemento con el átomo de menor tamaño en la tabla periódica. Debido a su pequeño tamaño, difunde con mucha fuerza en recubrimientos, porosidad y grietas de la superficie del acero, especialmente a bajas temperaturas (de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dentro de los aceros, que son nuestro material de interés, el hidrógeno puede estar en estado molecular (H_2), atómico (H) o unido químicamente [14].

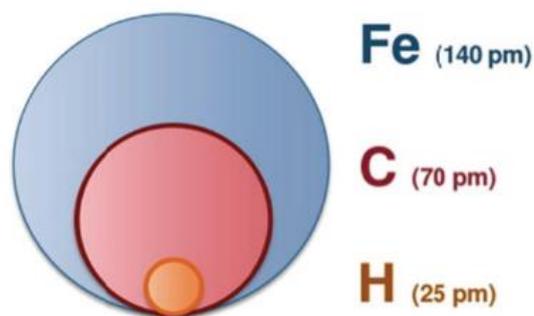


Figura 6. Comparativa de los tamaños atómicos del hierro, carbono e hidrógeno [14].

Además, el hidrógeno puede disolverse y acumularse no sólo en el acero, sino en la mayoría de metales y aleaciones, y sus interacciones con la red cristalina y átomos son motivo de preocupación también en el níquel, el titanio, el vanadio, el circonio, el silicio y otros metales utilizados en ingeniería.

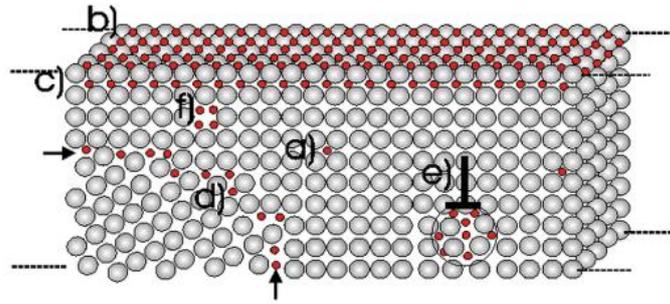


Figura 7. Zonas de acumulación del hidrógeno en los aceros y otros metales o aleaciones: a) sitios intersticiales; b) trampas superficiales; c) trampas subsuperficiales; d) límite de grano; e) dislocación; f) vacantes [15].

Los problemas relacionados con el hidrógeno en los materiales estructurales se manifiestan de numerosas formas, por ejemplo, facilita la fractura por corrosión bajo tensión, agrietamiento inducido por acumulación de hidrógeno y otros efectos nocivos, que a menudo conducen a una rotura catastrófica. Dado que el fallo catastrófico es inaceptable en ingeniería, es necesario reducir al máximo los efectos perjudiciales del hidrógeno [16]. Todas las vías de degradación inducida por el hidrógeno y fenómenos asociados a sus efectos nocivos se conocen como fragilización por hidrógeno, e implican fundamentalmente una reducción de las buenas propiedades mecánicas propias de materiales estructurales, como ductilidad y alta resistencia facilitando que el material se comporte de manera frágil [17].

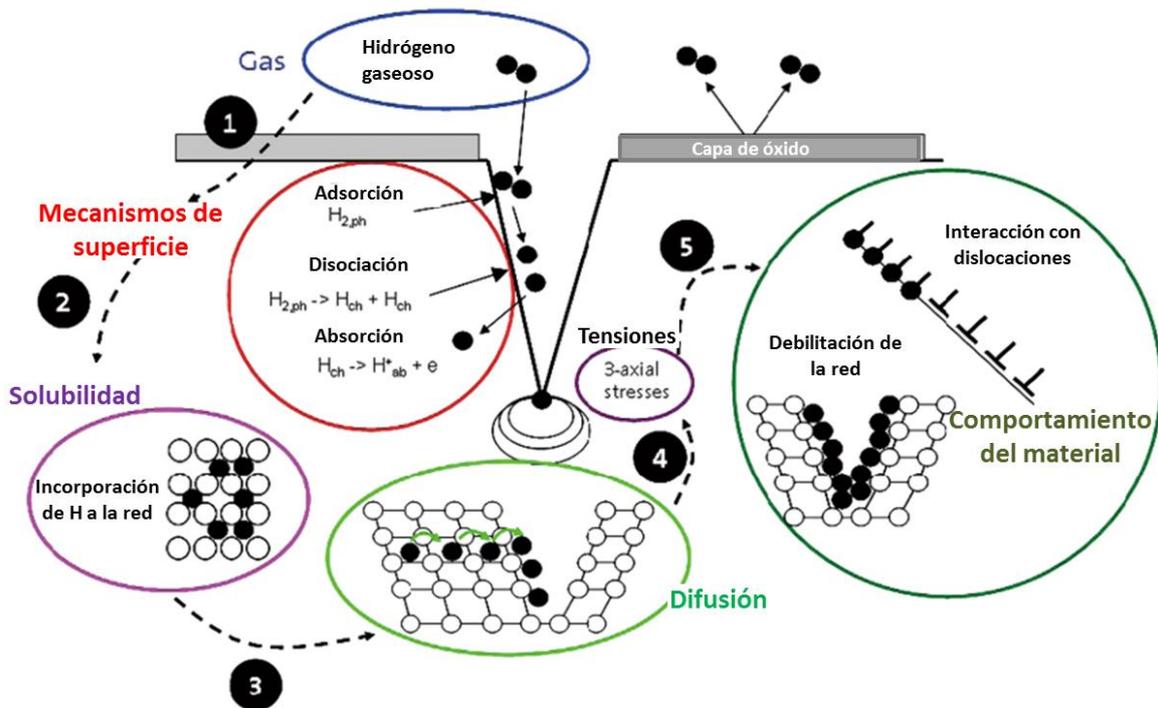


Figura 8 Mecanismo de incorporación del hidrógeno a la red cristalina de los materiales [15]

Para poder reducir el efecto fragilizante del hidrógeno, es de mucha ayuda conocer de manera básica su mecanismo de interacción con los materiales, que se muestra de manera esquemática en la Figura 8:

- En primer lugar el hidrógeno gaseoso tiene que introducirse en el material. Normalmente en estado molecular (H_2), el hidrógeno se adsorbe físicamente a la superficie y, posteriormente se disocia en dos átomos que pueden ser absorbidos dentro de la red cristalina.
- Una vez dentro, el hidrógeno se acumula en la red cristalina en determinada cantidad, que depende de la solubilidad en ese medio. Esto es un indicativo de cuánto hidrógeno puede contener el material, pero no implica necesariamente una tendencia a la fragilización mayor.
- Cuando el hidrógeno se encuentra en el interior del material puede moverse dentro de la red cristalina hasta acumularse en zonas que, por lo general, tienen algún tipo de defecto, discontinuidad o estado de tensiones concreto. Es importante mencionar que una velocidad de difusión alta del hidrógeno sí implica una tendencia mayor a que el material se fragilice, ya que este puede moverse fácilmente y acumularse rápidamente en las zonas clave, propiciando el daño mecánico. Este hidrógeno se denomina hidrógeno difusible y es el causante de la fragilización.
- El daño mecánico ocurre cuando el hidrógeno que ha logrado moverse hasta las zonas clave, debilita los enlaces de los átomos de material adyacente facilitando que la red cristalina pierda cohesión y los defectos aumenten de tamaño, hasta convertirse en grietas, que pueden provocar el fallo del componente.

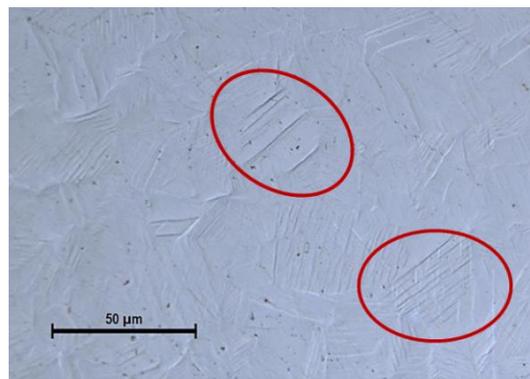


Figura 9. Fractura inducida por hidrógeno en la superficie de un acero inoxidable austenítico. Este fenómeno se observa como grietas dentro de los granos, todas en planos cristalinos preferenciales donde el hidrógeno se acumula de manera preferencial.

Así podemos sacar algunas conclusiones en cuanto a este fenómeno: el hidrógeno difusible es responsable de fallos relacionados con el hidrógeno, que conlleva una pérdida de propiedades mecánicas y la posibilidad de fallo del componente. Si el contenido de hidrógeno que difunde es inferior al nivel crítico de hidrógeno, las probabilidades de que se produzca fragilización pueden reducirse. Si el contenido de hidrógeno difusible es superior al crítico se producirá daño en el material y la gravedad dependerá además del tipo de material y las cargas o esfuerzos a los que el material esté sometido [18].

PROTECCIÓN DE LOS MATERIALES ESTRUCTURALES FRENTE A LA FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO

De acuerdo con el mecanismo de fragilización por hidrógeno, la prevención puede basarse en dos enfoques:

Modificación de la superficie para inhibir la interacción del hidrógeno con el material o retrasar el proceso de difusión del hidrógeno al interior del acero retardando la generación del daño y aumentando la vida útil del componente. Dentro de este grupo existen dos grandes métodos [15]:

- Tratamientos superficiales. Implican la modificación de la superficie del propio material mediante tratamientos mecánicos, térmicos o termomecánicos, tratamientos termoquímicos (carburación, nitruración...) [19] o generación de capas de óxido (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) [20],[21] que actúen como barrera para que el hidrógeno en contacto con el material no penetre en su red cristalina. Por ejemplo, se ha demostrado la eficacia de tratamientos térmicos como el temple, el revenido y el envejecimiento para mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia frente al hidrógeno. La modificación de la superficie mediante tratamientos mecánicos como el granallado, el granallado por cavitación y el granallado por láser también se han clasificado como adecuados para la prevención del daño por hidrógeno [10].

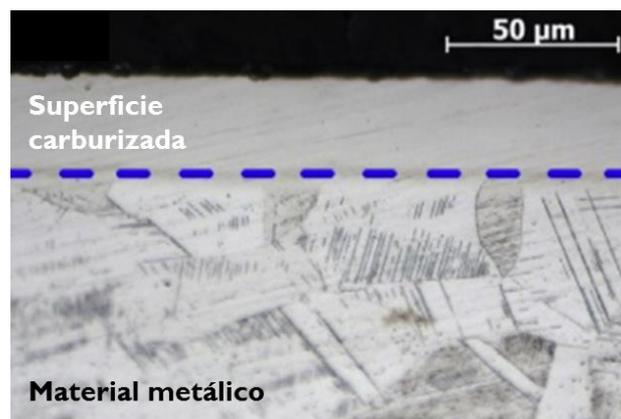


Figura 10. Tratamiento superficial de carburación para mitigarla entrada de hidrógeno en materiales metálicos [19]

- Recubrimientos. La funcionalización de la superficie de un material es una herramienta eficaz y sencilla que permite alterar las propiedades superficiales con requisitos deseados. En este caso la funcionalización de superficies tiene la finalidad de proteger los materiales estructurales de la difusión de hidrógeno. Este objetivo puede alcanzarse mediante la generación de una barrera física a la permeación que adsorba los pequeños átomos de hidrógeno e inhiba su entrada en el material. En general, la técnica de modificación de superficies más utilizada es la deposición de recubrimientos utilizando un material funcional con propiedades atractivas en términos de permeabilidad [10]. Algunos ejemplos de materiales empleados como recubrimiento para prevenir la fragilización por hidrógeno son cerámicos como la alúmina, zirconia, óxido de itrio, óxido de cromo o nitruro de boro [10][22][23]. También se han empleado metales como el cadmio, el aluminio o el zinc para generar barreras frente a la permeación de hidrógeno, así como algunos materiales

poliméricos (cauchos) como los fluoroelastómetos. Por otra parte, numerosos estudios tratan el grafeno como un inhibidor relevante de la fragilización por hidrógeno debido a su estructura atómica particular. Se predice que esta característica, que hace que el tamaño del poro de esta molécula sea de sólo 0,064 nm, es suficiente para bloquear la difusión de átomos de hidrógeno a través de la red cristalina del recubrimiento [24], [25].

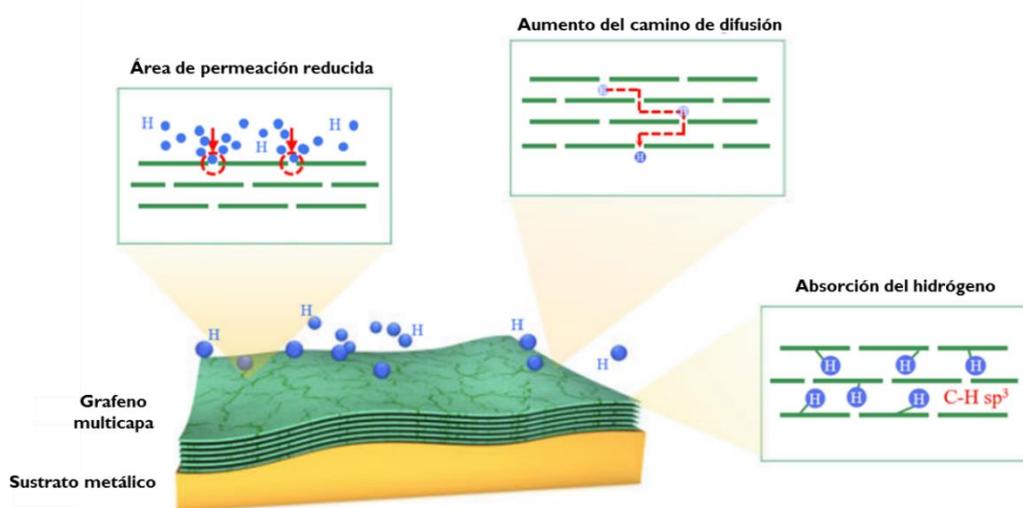


Figura 11. Ejemplo del uso del grafeno como recubrimiento para frenar la difusión del hidrógeno [25].

El segundo enfoque a la hora de proteger los aceros frente a la fragilización por hidrógeno es la modificación de la microestructura del material, basada en la adición/eliminación de los elementos de aleación apropiados y la optimización de la microestructura. Con esto se consigue generar sumideros que recogen el hidrógeno de manera inocua, evitando así que difunda hasta las zonas críticas y se acumule en ellas debilitando las características mecánicas del material [15]. Algunos ejemplos de estructuras que incorporan hidrógeno de manera inocua son las trampas irreversibles, de las cuales el hidrógeno es muy difícil que pueda salir (carburos, nitruros, defectos de red y átomos de elementos afines al hidrógeno como Ti o N), elementos absorbentes presentes en la microestructura que incorporan el hidrógeno (vacantes, TiC o carburos épsilon) o fases que limitan la velocidad de difusión en el acero como la austenita retenida. [26].

Todos estos métodos de protección mencionados ayudan de una u otra manera a frenar la difusión del hidrógeno en los materiales estructurales. Sin embargo, es fundamental evaluar su implantación a escala industrial para que la tecnología llegue a tener impacto en la sociedad.

INVESTIGACIÓN EN LA DIVISIÓN DE MATERIALES DE INTERÉS ENERGÉTICO DEL CIEMAT

En la División de Materiales de Interés Energético se ha comenzado trabajar en la mitigación del efecto fragilizante del hidrógeno en materiales estructurales empleados para su transporte y almacenamiento. El estudio se centra en aceros inoxidable austeníticos, y se extenderá a un acero inoxidable ferrítico y un acero al carbono empleado de manera convencional para el transporte de hidrocarburos. De los distintos métodos enumerados para reducir los efectos nocivos del hidrógeno en estos materiales, en la división de materiales empleamos la modificación de la superficie y el uso de recubrimientos base carbono.

ENSAYOS PARA ESTUDIAR LA INTERACCIÓN DEL HIDRÓGENO Y LOS MATERIALES

CARGA ELECTROQUÍMICA DE HIDRÓGENO

Para poner a prueba la protección frente al hidrógeno, los materiales se tienen que poner en contacto con este elemento. Existen varios métodos para introducir hidrógeno en los materiales.

La vía más sencilla es la introducción de hidrógeno generado electroquímicamente al conectar una solución acuosa, que puede ser ácida o básica, a una fuente de alimentación como se indica en la Figura, generando hidrógeno sobre la superficie de los materiales que poco a poco acaba por difundir en su interior. Otra vía es la carga gaseosa en autoclaves o depósitos a presión que simulen las condiciones reales de operación de materiales en contacto con hidrógeno. Este método es sin embargo más costoso y precisa de medidas de seguridad más estrictas ya que el hidrógeno está a alta presión y es inflamable.

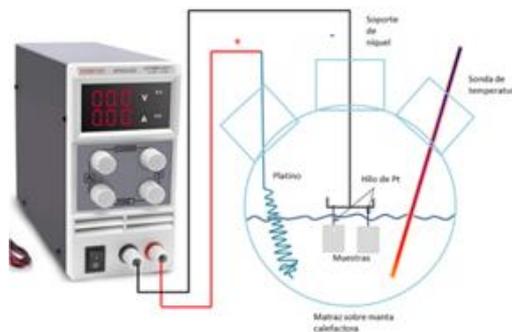


Figura 12. Esquema del experimento para la carga electroquímica de hidrógeno en materiales. Esta es la vía más sencilla de implementar a escala de laboratorio.

ANÁLISIS DE DESORCIÓN TÉRMICA

Mediante el análisis de desorción térmica (TDS), se puede evaluar el contenido de hidrógeno en el interior de un material. Esta técnica, desarrollada en el área de la ciencia de superficies, se utilizó por primera vez para estudiar la cinética de desorción de hidrógeno en hidruros alrededor de 1980. Brevemente, la técnica consiste en un estudio no isotérmico de la cinética de desorción. Una muestra, previamente cargada con hidrógeno, se calienta siguiendo un perfil de temperatura predefinido (normalmente una rampa lineal) mientras se registra la cantidad de gas desorbido del material [27].

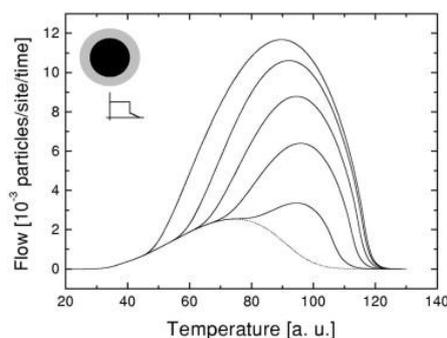


Figura 13. Espectros TDS de un proceso de desorción controlado por difusión en la solución sólida para diferentes concentraciones iniciales de hidrógeno (proporcional al área bajo el espectro) [27]

El gráfico del flujo de gas desorbido en función de la temperatura es un espectro TDS. Los espectros TDS suelen estar compuestos uno o varios picos de desorción, cada uno de los cuales puede estar asociado a un proceso cinético diferente. El objetivo principal de un experimento TDS es identificar el paso que limita la velocidad y determinar los parámetros cinéticos asociados al proceso.

ENSAYOS DE PERMEACIÓN DE HIDRÓGENO

La celda Devanathan-Stachurski es la técnica electroquímica más utilizada para estudiar la difusión y el atrapamiento del hidrógeno en aleaciones de hierro. Este montaje permite determinar el coeficiente de difusión y los efectos de atrapamiento del hidrógeno en aceros. En esta celda, se utiliza como muestra membrana o muestra de aleación de hierro de pequeño espesor para estudiar el proceso de transporte de hidrógeno.

En un lado de la membrana, se aplica un potencial negativo para forzar la adsorción de hidrógeno en la superficie de la muestra. Parte de los átomos de hidrógeno adsorbidos entrarán en la muestra y difundirán a través de la superficie como átomos absorbidos. El hidrógeno absorbido se difunde a través de la membrana de acero y llega a la otra superficie, comúnmente denominada lado de salida. En esta superficie, los átomos de hidrógeno se oxidan debido a un potencial anódico impuesto. Mediante un conjunto de potenciostatos, se registra una corriente anódica que depende del flujo de hidrógeno que llega al lado de salida. Utilizando los datos de corriente obtenida en función del tiempo, puede estimarse el coeficiente de difusión del hidrógeno en los aceros.

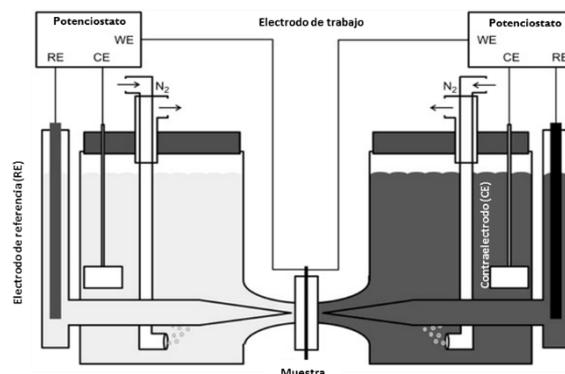


Figura 14. Esquema de una celda Devanathan-Stachurski para la estimación del coeficiente de difusión del hidrógeno en aceros.

ENSAYOS DE NANOINDENTACIÓN

Es imperativo conocer cómo son las características mecánicas de los materiales a lo largo de todo el estudio de mitigación de los efectos nocivos del hidrógeno sobre los aceros. También es imprescindible conocer las propiedades mecánicas de recubrimientos, capas de óxido y las superficies resultantes de cualquier tratamiento realizado sobre los materiales. De esta manera se podrá asegurar que tras las modificaciones los materiales siguen cumpliendo con los requisitos estructurales.

Para ello se realizan ensayos de nanoindentación, que permiten estudiar los cambios de las propiedades mecánicas en pequeños volúmenes de material cercanos a la superficie evaluando la deformación generada en el material al aplicar cargas de mili Newtons.

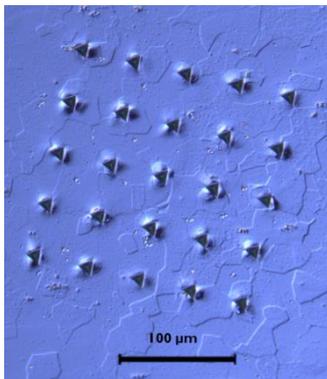


Figura 12. Huellas sobre la superficie de un acero tras su ensayo de nanoindentación.

CONCLUSIONES

La búsqueda por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como el constante crecimiento en la demanda de energía mundial precisa de la implantación de sistemas de aprovechamiento de energía limpios y renovables que sin embargo son intermitentes en el suministro. En este marco para un futuro sostenible, el hidrógeno se está convirtiendo poco a poco en un vector energético de gran utilidad, que permitiría almacenar y transportar energía de manera eficiente. Para que el hidrógeno pueda integrarse de manera eficaz y segura en la industria y alcanzar a todos los sectores de la sociedad es imprescindible contar con una infraestructura segura y eficiente. Los principales materiales estructurales empleados en la cadena de valor del hidrógeno son los aceros. Estos tienen las propiedades mecánicas ideales para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, sin embargo, un contacto prolongado con este elemento genera en los aceros un efecto de pérdida de sus buenas propiedades mecánicas, denominado fragilización por hidrógeno, que puede llevar a la rotura del material en servicio. Surge de esta manera la necesidad de desarrollar mecanismos de protección y mitigación de este efecto de degradación en los aceros. El estudio de herramientas de protección de los aceros frente al hidrógeno ha tomado relevancia en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales, habiéndose investigado numerosas estrategias para conseguir mejoras y hacer más segura la infraestructura para la distribución de hidrógeno.

REFERENCIAS

- [1] F. Dawood, M. Anda, and G. M. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: An overview," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3847–3869, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- [2] S. Z. Baykara, "Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10605–10614, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.022.

- [3] BP, "BP Statistical Review of World Energy 2022,(71st edition)," 2022. [Online]. Disponible: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.
- [4] A. Züttel, A. Remhof, A. Borgschulte, and O. Friedrichs, "Hydrogen: The future energy carrier," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 368, no. 1923, pp. 3329–3342, 2010, doi: 10.1098/rsta.2010.0113.
- [5] Y. Yang *et al.*, "Status and challenges of applications and industry chain technologies of hydrogen in the context of carbon neutrality," *J. Clean. Prod.*, vol. 376, no. June, p. 134347, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134347.
- [6] O. Faye, J. Szpunar, and U. Eduok, "A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 29, pp. 13771–13802, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.112.
- [7] A. Peschel, "Industrial Perspective on Hydrogen Purification, Compression, Storage, and Distribution," *Fuel Cells*, vol. 20, no. 4, pp. 385–393, 2020, doi: 10.1002/face.201900235.
- [8] Y. Qiu, H. Yang, L. Tong, and L. Wang, "Research progress of cryogenic materials for storage and transportation of liquid hydrogen," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 7, 2021, doi: 10.3390/met11071101.
- [9] T. Zhou and H. Yuk, "Omnidirectional printing of stretchable electronics," *Nat. Electron.*, 2023, doi: 10.1038/s41928-023-00943-x.
- [10] N. E. Laadel, M. El Mansori, N. Kang, S. Marlin, and Y. Bousant-Roux, "Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals – A review on mechanisms, materials suitability and efficiency," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 76, pp. 32707–32731, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.164.
- [11] E. S. Drexler, R. L. Amaro, A. J. Slifka, P. E. Bradley, and D. S. Lauria, "Operating Hydrogen Gas Transmission Pipelines at Pressures Above 21 MPa," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 140, no. 6, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1115/1.4041689.
- [12] C. Wang *et al.*, "Study on hydrogen embrittlement susceptibility of X80 steel through in-situ gaseous hydrogen permeation and slow strain rate tensile tests," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 243–256, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.228.
- [13] T. Michler, "Austenitic Stainless Steels," *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, 2016, doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.02509-1.
- [14] H. Hrdinová, V. Kreibich, J. Kudláček, and J. Horník, "Hydrogen Embrittlement After Surface Treatments," *Advances in Manufacturing II Volume 4 - Mechanical Engineering*. pp. 266–275, 2019.

- [15] X. Li, X. Ma, J. Zhang, E. Akiyama, Y. Wang, and X. Song, "Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention," *Acta Metall. Sin. (English Lett.)*, vol. 33, no. 6, pp. 759–773, 2020, doi: 10.1007/s40195-020-01039-7.
- [16] O. Barrera *et al.*, "Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum," *J. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 9, pp. 6251–6290, 2018, doi: 10.1007/s10853-017-1978-5.
- [17] I. M. Robertson *et al.*, "Hydrogen Embrittlement Understood," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 6, pp. 2323–2341, 2015, doi: 10.1007/s11661-015-2836-1.
- [18] S. K. Dwivedi and M. Vishwakarma, "Hydrogen embrittlement in different materials: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 46, pp. 21603–21616, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.201.
- [19] Y. Jiang, Q. Wu, Y. Wang, J. Zhao, and J. Gong, "Suppression of hydrogen absorption into 304L austenitic stainless steel by surface low temperature gas carburizing treatment," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 43, pp. 24054–24064, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.112.
- [20] S. W. Ooi, P. Yan, and R. H. Vegter, "Black oxide coating and its effectiveness on prevention of hydrogen uptake," *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 35, no. 1, pp. 12–25, 2019, doi: 10.1080/02670836.2018.1530425.
- [21] T. Zhang *et al.*, "Effects of surface oxide films on hydrogen permeation and susceptibility to embrittlement of X80 steel under hydrogen atmosphere," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 6, pp. 3353–3365, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.170.
- [22] D. He *et al.*, "Influence of microstructure on the hydrogen permeation of alumina coatings," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 22, pp. 9343–9348, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.065.
- [23] M. Tamura, M. Noma, and M. Yamashita, "Characteristic change of hydrogen permeation in stainless steel plate by BN coating," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 260, pp. 148–154, 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.09.041.
- [24] T. H. Nam, J. H. Lee, S. R. Choi, J. B. Yoo, and J. G. Kim, "Graphene coating as a protective barrier against hydrogen embrittlement," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 22, pp. 11810–11817, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.132.
- [25] K. Shi *et al.*, "Hydrogen permeation behavior and mechanism of multi-layered graphene coatings and mitigation of hydrogen embrittlement of pipe steel," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 573, no. August 2021, 2022, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151529.

- [26] H.K.D.H. Bhadeshia, "Prevention of Hydrogen Embrittlement in Steels," *ISIJ Int.*, vol. 56, no. 1, pp. 24–36, 2016.
- [27] F. J. Castro and G. Meyer, "Thermal desorption spectroscopy (TDS) method for hydrogen desorption characterization (I): Theoretical aspects," *J. Alloys Compd.*, vol. 330–332, pp. 59–63, 2002, doi: 10.1016/S0925-8388(01)01625-5.
- [28] F. Von Zeppelin, M. Haluška, and M. Hirscher, "Thermal desorption spectroscopy as a quantitative tool to determine the hydrogen content in solids," *Thermochim. Acta*, vol. 404, no. 1–2, pp. 251–258, 2003, doi: 10.1016/S0040-6031(03)00183-7.

AUTORES

Jorge Nájera Álvarez.

Ingeniero industrial. Unidad de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Su trabajo está centrado en el diseño, modelado, desarrollo e integración de sistemas de almacenamiento de energía para diferentes aplicaciones, entre las que destacan transporte (trenes ultra-rápidos y automóviles eléctricos) y aplicaciones de red (flexibilidad y servicios de ajuste). Además, tiene amplia experiencia en puesta en marcha y ensayos de laboratorio de prototipos experimentales, incluyendo el desarrollo del control y comunicaciones, así como de sistemas Hardware-in-The-Loop.

Silvia Guerra Rodríguez.

Ingeniera de materiales. Unidad de Caracterización Microestructural y Microanálisis.

Desarrolla su tesis doctoral en el estudio del efecto que tiene la radiación de partículas energéticas (iones, neutrones) en la microestructura de materiales metálicos, particularmente los que se emplean para construir reactores nucleares. También estudia los diferentes mecanismos de deformación que tienen lugar en estos materiales irradiados, con el objetivo de comprender los procesos que pueden llevar al fallo de los componentes en operación.

Óscar Durán Lucas.

Ingeniero mecánico. Unidad de Aceleradores de Partículas.

Trabaja en el diseño, cálculo, prototipado y fabricación de componentes para aceleradores de partículas. Está involucrado en el desarrollo de un imán superconductor que corrige la trayectoria de las partículas e irá instalado en el acelerador LHC del CERN en Ginebra para hacer estudios de física de partículas. La tecnología de este imán podría ser utilizada en aceleradores de partículas más pequeños, usados para aplicaciones médicas.

Marta Ibáñez Moragues.

Graduada en biología. Unidad de Aplicaciones Médicas.

Realiza el doctorado en radiobiología e inmunoterapia. Actualmente su trabajo se centra en el desarrollo de nanopartículas para verificar la dosis de radiación recibida en distintos tipos de cáncer tratados con protonterapia. Además, busca la forma de optimizar los tratamientos de radioterapia convencional (terapia con haces de fotones) mediante el uso de imagen molecular y de protones, así como la combinación de dichos tratamientos con inmunoterapia para hacerlos menos invasivos.

Jesús Carreras Molina.

Ingeniero de materiales. Unidad de Caracterización Microestructural y Microanálisis.

Realiza su tesis doctoral en materiales de interés energético. Su labor investigadora consta del estudio y caracterización de varios tipos de barreras (capas de óxidos o recubrimientos base carbono) que reduzcan e incluso imposibiliten la introducción del hidrógeno en los materiales. Con este estudio se pretende alargar la vida útil de las infraestructuras y componentes en servicio y facilitar la integración del hidrógeno como fuente de energía primaria en la transición energética.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas