

El desarrollo de tecnologías de aceleradores de partículas en el CIEMAT y el CEDEX

Particle accelerator technology developments at CIEMAT and CEDEX

L. García-Tabarés^{1*}

Palabras clave

acelerador; aplicaciones; imanes; superconductividad; radio frecuencia; LHC; E-XFEL; IFMIF;

Resumen

El presente artículo, resume las actividades de la División de Ingeniería Eléctrica del CIEMAT en el campo de los aceleradores de partículas que, en estrecha colaboración con el CEDEX, ha desarrollado diversas tecnologías y componentes, tanto para grandes instalaciones internacionales, como para aceleradores propios.

Tras una introducción al principio de funcionamiento de un acelerador, los tipos existentes y sus principales aplicaciones, el artículo describe, por una parte, las contribuciones más significativas del grupo en las grandes instalaciones internacionales y por otra el desarrollo de una máquina propia para aplicaciones médicas, que actualmente se encuentra en fase de fabricación y montaje.

Keywords

accelerator, applications; magnets; superconductivity; radio frequency; LHC; E-XFEL; IFMIF;

Abstract

The present paper summarizes the activities of the Electrical Engineering Division in the field of particle accelerators, which, in close cooperation with CEDEX, is developing different technologies and components for both big international facilities and, also, for our own accelerators.

After an introduction describing both the working principle of acceleration and its main types and applications, the paper analyses, on the one hand, the most significant contributions made by the group aforementioned to large international facilities; and, on the other, to the development of a complete accelerator for medical applications, which is currently in the fabrication and assembly phase.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceleradores de partículas no solo son complejos equipos científicos utilizados en sofisticadas investigaciones sobre la estructura íntima de la materia, son también máquinas usadas en diferentes aplicaciones civiles y que cada día tienen mayor impacto en nuestra sociedad.

Tradicionalmente, se ha considerado que un acelerador de partículas tiene tres tipos de aplicaciones genéricas [1]: a) El análisis de muestras para conocer su composición química b) La modificación de las propiedades físicas de un material y c) El estudio de la estructura más elemental de la materia.

Al primer grupo pertenecen, por ejemplo, desde los pequeños aceleradores lineales para la datación de obras de arte por técnicas Pixie, hasta los grandes sincrotrones que emiten radiación muy colimada en la banda de los rayos X para determinar la estructura de complejas moléculas por técnicas de difracción.

Ejemplos del segundo grupo son los aceleradores de implantación iónica que, colocando determinados iones en la superficie de un cuerpo, consiguen mejorar notablemente sus propiedades (por ejemplo las mecánicas). Dentro de este grupo de aceleradores, cada día tienen más importancia los utilizados en física médica, con dos aplicaciones muy diferentes: Una terapéutica (especialmente

en oncología), en la que las partículas aceleradas modifican las propiedades del tejido afectado y otra diagnóstica, donde los aceleradores sirven para fabricar sustancias radioactivas que actúan de trazadores para la detección de enfermedades.

Finalmente, al tercero pertenecen los grandes aceleradores de elevadísima energía, en los que se colisionan partículas y se analizan los productos de la colisión para conocer la estructura de la materia al nivel más fundamental. El ejemplo más conocido es el Large Hadron Collider (LHC) en el CERN, en el que recientemente se descubrió la existencia del Boson de Higgs.

Desde hace más de 25 años, la actual División de Ingeniería Eléctrica de Centro de Investigaciones Energéticas MedioAmbientales y Tecnológicas (CIEMAT), en estrecha colaboración con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), trabaja en el desarrollo de componentes de aceleradores de partículas e incluso de aceleradores completos para diferentes aplicaciones, colaborando intensamente con las más prestigiosas instalaciones mundiales.

2. QUE ES UN ACELERADOR DE PARTICULAS Y COMO FUNCIONA

El nombre de acelerador sugiere que se trata de un dispositivo que aumenta la velocidad de una partícula lo cual, aunque es estrictamente cierto, no es lo más relevante, ya que en aplicaciones relativistas, en las que las partículas viajan a casi la velocidad de la luz, la misión del acelerador

* Autor de contacto: luis.garcia@ciemat.es

¹ Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, España.

no es tanto incrementar su velocidad (limitada por la teoría de la relatividad) como la de aumentar su energía. Por otra parte, en el mundo de los aceleradores, es frecuente expresar esta energía en múltiplos del electrón-voltio (eV) que corresponde a la energía que tiene una partícula con la carga del electrón cuando se la somete a una diferencia de potencial de un voltio. Resulta sorprendente ver como a lo largo de la historia de los aceleradores, la energía de las partículas ha aumentado de algunos kiloeV (keV) a decenas de TeraeV (Tev), es decir ha aumentado en un factor de mil millones de veces.

Existen muchos tipos de aceleradores de partículas de los que luego hablaremos, sin embargo todos parten de principios relativamente simples que, a su vez, se basan en las leyes del electromagnetismo [2].

Para poder acelerar (energizar) una partícula, la primera condición es la de que la partícula este eléctricamente cargada. Por lo tanto, de lo primero que hay que disponer es de una fuente de partículas cargadas (fuente de iones). Existen diversos tipos de fuentes de iones, siendo las más conocidas las que se basan en la ionización de los átomos por electrones liberados por efecto termoiónico. Dependiendo del ion que se quiere obtener, se pueden usar Cañones de Electrones, Fuentes Penning, Fuentes de Resonancia Ciclotrónica de Electrones, etc. La figura 1.a muestra una fuente Penning desarrollada en nuestro grupo para un acelerador con aplicaciones médicas tipo ciclotrón [3].

De la fuente de iones sale una determinada corriente de partículas que tiene una energía muy reducida que se desea incrementar, es el verdadero proceso de aceleración que conceptualmente se realiza de una forma sencilla; aplicando un campo eléctrico de la polaridad adecuada. El producto de la carga de la partícula por la tensión del campo eléctrico que ve la partícula, proporciona la energía requerida.

Existen diferentes formas de aplicar ese campo, lo que está claro es que cuanto más intenso, más energía conseguimos. En los primeros aceleradores, el campo se producía entre dos placas metálicas a las que se aplicaba una diferencia de potencial en continua proveniente de un multiplicador de tensión o de un generador electrostático. Poco a poco se fueron introduciendo nuevos conceptos para incrementar la energía, pero curiosamente, no todos pasaban por cambiar la tecnología utilizada, sino que una de las ideas más fecundas consistió en: o bien disponer de múltiples elementos de aceleración que iban aumentando secuencialmente la energía de las partículas, o bien hacer que las partículas pasaran repetidamente por los elementos de aceleración, o bien las dos cosas a la vez, muchos elementos de aceleración por los que se hacía pasar a las partículas muchas veces [4].

En una evolución similar a la que sufrió la distribución eléctrica comercial, se cambió de la tensión continua a la alterna de frecuencia relativamente moderada, primero y ultraelevada después. Trabajar en corriente alterna permitía subir las tensiones de aceleración fácilmente, aunque tenía el inconveniente que su polaridad debía de estar perfectamente sincronizada con el paso de las partículas, de lo contrario en vez de acelerarlas podría frenarlas.

Un escalón más para aumentar la energía consistió en desarrollar las llamadas cavidades de radiofrecuencia que

consistían en superficies cerradas metálicas (que pueden visualizarse como un condensador y una autoinducción en paralelo) y que se alimentaban a su frecuencia de resonancia, lo que inducía en su interior un campo eléctrico de aceleración de gran intensidad, solo limitado por la resistencia eléctrica de las paredes de la cavidad [5].

Paralelamente, se desarrolló el concepto de la aceleración por inducción, consistente en utilizar un campo magnético variable en el tiempo, que inducía un campo eléctrico que se aprovechaba para acelerar las partículas [6].

La figura 1.b muestra una cavidad de radiofrecuencia desarrollada en nuestro grupo para un acelerador también para aplicaciones médicas, llamado “Racetrack Microtron”.

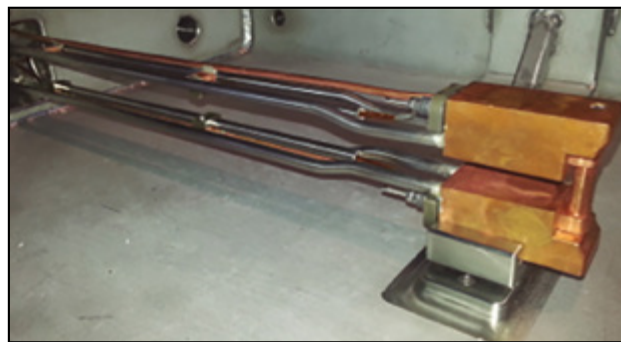


Figura 1a. Fuente Penning de H^+ para un Ciclotrón.

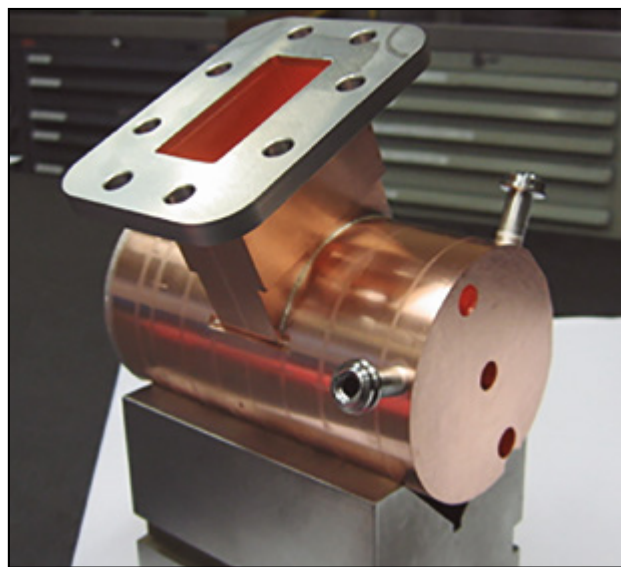


Figura 1b. Cavidad Resonante para un Microtrón.

Cuando las partículas se aceleraban una sola vez en el o los elementos de aceleración, el acelerador tenía una estructura lineal: en un extremo la fuente y a continuación los elementos de aceleración, hasta llegar al otro extremo en el que se colocaba el blanco a irradiar. Cuando se pretendía recircular las partículas en los elementos de aceleración, no quedaba más remedio que recurrir a una estructura cerrada (normalmente circular), en la que los elementos de aceleración estaban dispuestos en una zona de la circunferencia y las partículas pasaban múltiples veces a su través para ganar energía paulatinamente.

El problema consistía en cómo hacer que las partículas siguiesen trayectorias curvas. Para ello era necesario

recurrir a campos magnéticos que producen fuerzas siempre perpendiculares a la velocidad de la partícula, por lo que son incapaces de comunicarla energía (no aceleran) pero si modifican su trayectoria. En aceleradores circulares, por lo tanto, se necesitaba disponer de imanes que creasen un campo constante (dipolos) y perpendicular a la trayectoria de las partículas.

¿Cómo de intenso debía ser el campo magnético necesario?. Se puede demostrar con facilidad que para el caso de los grandes aceleradores relativistas, el campo necesario es proporcional a la energía de las partículas e inversamente proporcional al radio del acelerador. A medida que aumenta la energía, y para un radio determinado, aumenta el campo necesario.

Hasta hace relativamente pocos años, estos campos magnéticos estaban limitados a los que se conseguían con imanes convencionales con núcleo de hierro (del orden de 1,5 T), que eran adecuados para aceleradores de energía moderada [7]. El problema surgió cuando se quiso subir la energía sin recurrir a radios gigantes: había que subir el campo magnético y eso la tecnología convencional no lo permitía [8].

Surgieron, entonces, los imanes superconductores, capaces de generar campos magnéticos muy intensos sin requerir un gran consumo de eléctrico; se podían conseguir campos cercanos a los 10T. [9]. Esto permitió, por ejemplo, construir el ya mencionado LHC, un acelerador con un radio próximo a los 4300 m y una energía por haz de 7 TeV.

Hay que añadir que la superconductividad no solo encuentra aplicación en los imanes, sino también en las cavidades de aceleración. Si el material con el que se fabrican es superconductor, no tiene resistencia eléctrica y se pueden conseguir campos de aceleración muy intensos con mínimas pérdidas.

Ya se trate de aceleradores lineales, que no necesitan dipolos (por lo menos intensos), o de aceleradores circulares, que si que los necesitan, ambos requieren de otros imanes de corrección y focalización; son verdaderas lentes magnéticas que focalizan la trayectoria de las partículas para confinarla dentro de un determinado volumen y corrigen defectos ópticos como la cromaticidad del haz [10]. Los imanes focalizadores son los llamados cuadrupolos y los correctores ópticos los sextupolos, octupolos y decapolos.

La figura 2 muestra sendos cuadrupolos desarrollados por el grupo. El de la figura 2.a es de tipo resistivo y se utilizará en una acelerador lineal para el proyecto IFMIF y el de la figura 2.b es un cuadrupolo superconductor desarrollado como prototipo para el LHC (fue motivo de portada de esta revista en el número 92 de 1993).

Además de los elementos de aceleración, guiado y focalización los aceleradores cuentan con un gran número de componentes adicionales que posibilitan su funcionamiento, entre otros, los sistemas de ultra alto vacío para la cámara por la que viajan las partículas aceleradas, las fuentes de potencia que alimentan tanto a los elementos de aceleración como a los imanes, la instrumentación que monitoriza los parámetros del haz de partículas y las variables de funcionamiento de los componentes del acelerador, los sistemas de refrigeración, con especial atención a los criogénicos cuando se trata de imanes o cavidades superconductoras, etc.

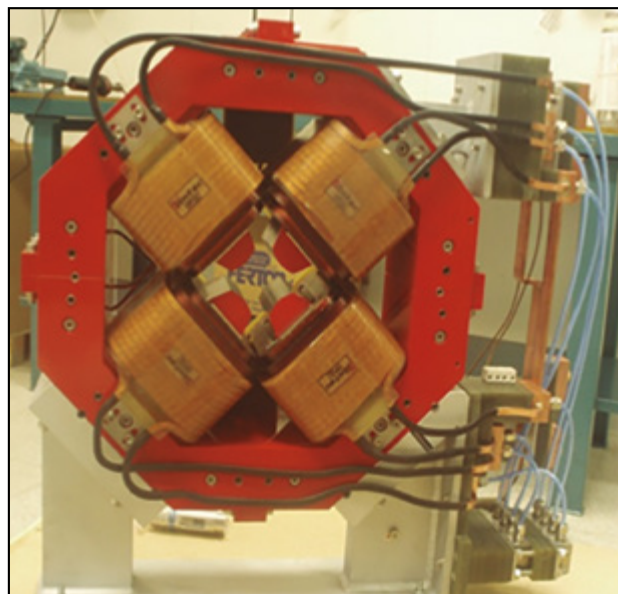


Figura 2a. Cuadrupolo resistivo para IFMIF.

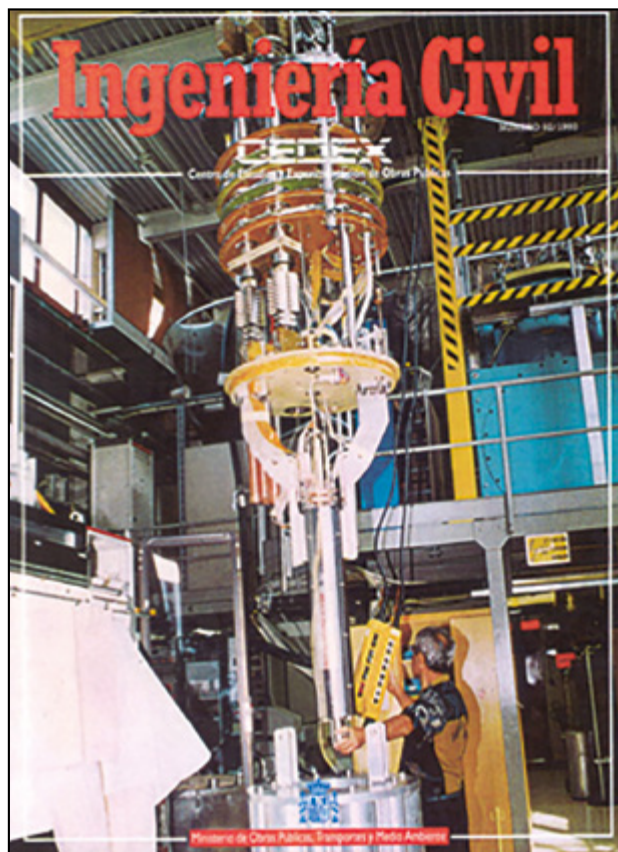


Figura 2b. Prototipo de cuadrupolo superconductor para el LHC.

A modo de resumen, la tabla 1 muestra los principales tipos de aceleradores existentes en la actualidad, su principio de aceleración y las aplicaciones más características [11]. Se han resaltado en rojo, aquellos tipos de aceleradores en los que el grupo ha participado, ya sea en alguno de sus componentes o en el acelerador completo.

3. LA PARTICIPACIÓN CIEMAT/CEDEX EN GRANDES INSTALACIONES INTERNACIONALES

A lo largo de los años de actividad del grupo, han sido muchos los proyectos de grandes instalaciones de

Tabla 1. Principales tipos de aceleradores existentes y sus aplicaciones

	Acelerador	Sistema aceleracion	Principales aplicaciones
Lineales	Electrostático	Campo Electrostatico	* Radioterapia
	Inducción	Inducción Electromagnética	* Electrónterapia
			* Neutronterapia
	Resonante	Cavidades Resonantes	* Producción de radioisótopos
Circulares			* Implantación iónica
			* Inspección de cargas por activación neutrónica
			* Investigación Científica
			* Electrónterapia
			* Inspección de soldaduras
			* Inspección de defectos en piezas
			* Inspección de cargas por activación neutrónica
	Ciclotrón	Resonador	* Protonterapia
			* Producción de radioisótopos
			* Física nuclear
Circulares			* Investigación científica
	Microtrón	Cavidad Resonante	* Electronterapia intraoperatoria
			* Radiografiado de piezas
			* Física nuclear
			* Protonterapia
			* Hadrónterapia
			* Fabricación de materiales avanzados
			* Análisis medioambiental
			* Industria alimentaria
			* Medicina forense
Circulares	Sincrotrón	Cavidad Resonante	* Fabricación de medicamentos
			* Análisis molecular
			* Investigación científica
			* Hadronterapia
			* Terapia por captura neutrónica de boro
			* Investigación científica
Circulares	Gradiente Alternativo (FFAG)	Cavidad Resonante	

aceleradores, en los que se ha colaborado. En este apartado se describen aquellos en los que se ha tenido una participación más intensa.

LHC en el CERN

El LHC es un colisionador circular de hadrones consistente en dos haces de protones que circulan en direcciones opuestas, cada uno con una energía máxima de 7 TeV [12]. Como se comentó en el apartado anterior, el LHC utiliza dipolos superconductores de 8,3 T de campo magnético máximo pero, además, el resto de sus imanes de focalización y corrección también son superconductores , aunque su tamaño es en general mucho menor que el de los dipolos.

Precisamente, fue el desarrollo de uno de estos imanes el que comenzó la actividad del grupo en el campo de los aceleradores de partículas. Se trataba de un cuadrupolo de sintonía que se desarrolló entre 1989 y 1992 y que aparece en la figura 2.b [13].

A partir de ese primer desarrollo, comenzó una extensa y prolongada actividad para calcular, diseñar, construir y ensayar prototipos de imanes correctores para el LHC. Esta etapa, muy fructífera para el grupo, incluyó una fase de I+D+i pura en la que se analizó experimentalmente uno de los aspectos más críticos en el diseño de imanes superconductores; la determinación de la pre-compresión necesaria en los devanados superconductores para evitar que se produzcan pequeños movimientos en los cables que los hagan transitar al estado normal (quench). Para ello se desarrolló una prensa superconductora que ejercía una fuerza variable sobre una bobina de un sextupolo y se analizó el comportamiento al quench de esa bobina [14].

Fruto parcial de este trabajo de I+D+i, fue la adjudicación a una empresa española de la fabricación de unas 1200 unidades de sextupolos superconductores para el LHC.

La figura 3.a muestra la prensa superconductora , mientras que en la figura 3.b aparece la instalación en las dependencias del CIEMAT de la bobinadora en la que se fabricaron algunos de los prototipos de imanes superconductores para el CERN.

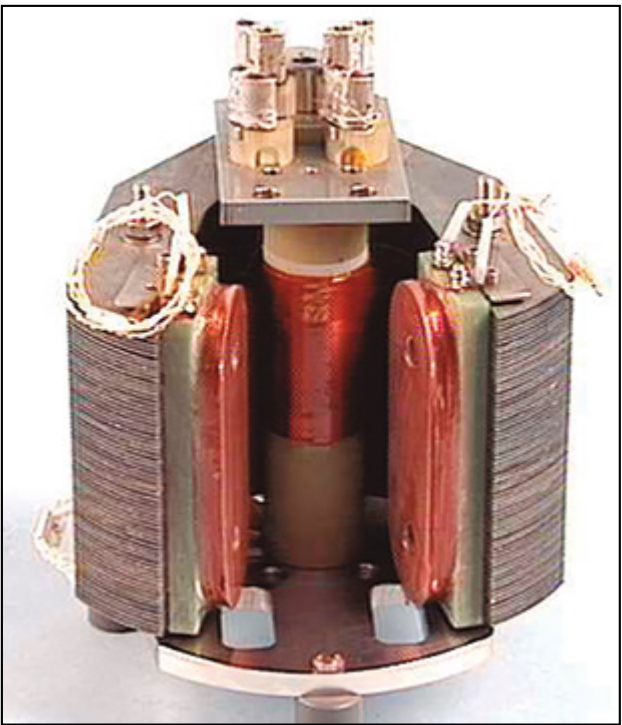


Figura 3a. Prensa superconductora para ensayos de pre-compresión.



Figura 3b. Instalación devanadora en el CIEMAT.

Aunque el LHC se encuentra en operación desde el año 2008, su funcionamiento ha sido progresivo, de manera que en la primera fase trabajó con valores reducidos de energía y luminosidad (aun así tremendamente fructífero puesto que en él se descubrió el Bosón de Higgs) y tras un periodo de puesta a punto y modificaciones (especialmente en los circuitos de protección de los imanes superconductores) acaba de ser reiniciado para trabajar a valores nominales de energía y luminosidad.

Sin embargo, ya se está trabajando en una fase posterior del LHC. Es el llamado LHC HiLumi (High Luminosity), en el que a partir de unos cambios importantes, especialmente en la zona donde colisionan las partículas y que implican nuevos desarrollos tecnológicos, se quiere incrementar la luminosidad (magnitud asociada al número de colisiones que se producen por segundo) en un factor 10 [15].

Nuestro grupo también está trabajando para esta segunda fase del LHC. Concretamente y en línea con la experiencia desarrollada, participamos en la construcción de un prototipo de dipolo doble (dos dipolos en un solo imán) que tiene una gran dificultad tecnológica por el enorme par de fuerzas que aparece entre los dos dipolos. Previamente y también para esta nueva fase del LHC, se han construido un prototipo de sextupolo y otro de octupolo, ambos superconductores con dimensiones adaptadas a su nueva ubicación y con mayor resistencia a la radiación.

CLIC en el CERN

CLIC (Compact Linear Collider) es un acelerador lineal en fase de diseño en el CERN, que pretende ser una futura alternativa tras el LHC. Se trata de un colisionador de electrones y positrones, con una energía total de 3 TeV, que está basado en un novedoso sistema de aceleración, especialmente en lo que se refiere a como se alimentan las cavidades de radiofrecuencia [16]. En vez de utilizar los klystrons convencionales, se recurre a disponer de otro acelerador de baja energía y de gran corriente que corre en paralelo con el acelerador principal de CLIC. Ese acelerador secundario utiliza cavidades de aceleración convencionales y tiene unos dispositivos llamados PETS (Power Extraction Transfer Structures) por cuyo interior circula el haz de partículas que, al pasar por cada PETS, pierde energía en forma de radiofrecuencia que se utiliza para alimentar las cavidades del acelerador principal (llamadas Estructuras de Aceleración).

La participación de nuestro grupo en CLIC se remonta a 2004, año en el que se empezaron a diseñar y construir

dispositivos para una instalación de prueba de concepto de CLIC llamada CTF3. Para ella se desarrollaron diversos componentes como imanes convencionales, imanes de extracción del haz (imanes Septa) imanes de pre-extracción (imanes Kickers), mesas de posicionamiento, pero sobre todo, diferentes versiones de los PETS [17], equipos de enorme dificultad tecnológica por las estrechas tolerancias de fabricación de sus componentes. Esta actividad ha sido, como en otros casos, un gran ejemplo de colaboración entre Centros de Investigación y la Industria Española, que ha intervenido en todas las fases del proceso de desarrollo.

La figura 4.a muestra un imán Kicker instalado en CTF3, mientras que la figura 4.b muestra un PETS en la nave de componentes para aceleradores de partículas del CEDEX en Julián Camarillo.



Figura 4a. Imán Kicker para el CTF3 de CLIC.



Figura 4b. Power Extraction Transfer Structure (PETS) para CLIC.

E-XFEL en DESY

Otra de las instalaciones en las que el grupo ha sido muy activo en los últimos años es en el Laser Europeo de Electrones libres en las instalaciones del Síncrotrón Alemán (DESY). La instalación incluye un acelerador lineal de 17

GeV, seguido de un conjunto de imanes onduladores en los que se generan los rayos X [18].

En este caso nuestra participación ha sido tanto en el acelerador como en el sistema de producción de rayos X y ha tenido una complementariedad absoluta con la industria del sector, siguiendo un modelo que ha resultado muy provechoso: la contribución técnica española a esta instalación internacional ha sido canalizada por el CIEMAT y ha consistido en entregar a E-XFEL tres series de unos cien componentes cada una, aproximadamente, consistentes en imanes superconductores combinados (dipolos + cuadrupolos) para el acelerador, y mesas de posicionamiento de imanes resistivos y armarios de control para el ondulador. Además, se han construido varios prototipos de un imán permanente para ajuste de fase.

Nuestro grupo se ha encargado de desarrollar los primeros prototipos de las series, cualificar a las empresas suministradoras y lanzar y seguir los contratos de fabricación. A día de escribir este artículo, prácticamente todos los equipos están entregados en DESY a la espera de su instalación final.

La figura 5.a muestra el imán superconductor combinado en fase de construcción y en ella se aprecian los devanados, tanto del cuadrupolo como de los dos dipolos (sobre el tubo por el que viajan las partículas), mientras que en la figura 5.b aparece el imán completamente acabado y dentro de su recipiente criogénico [19].

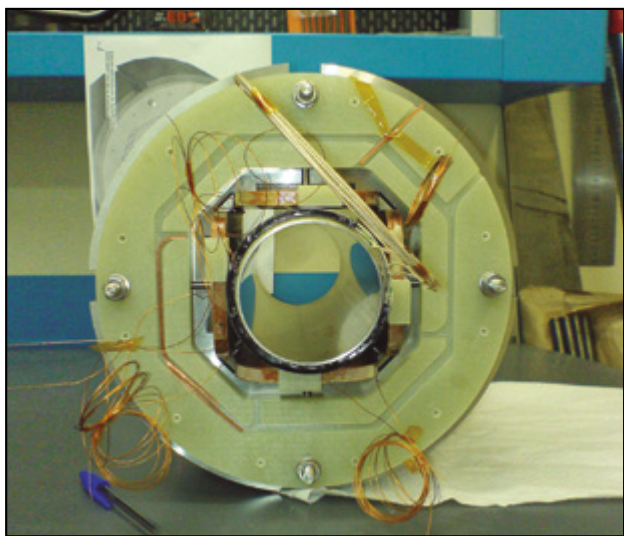


Figura 5a. Imán combinado en construcción para el acelerador de E-XFEL.

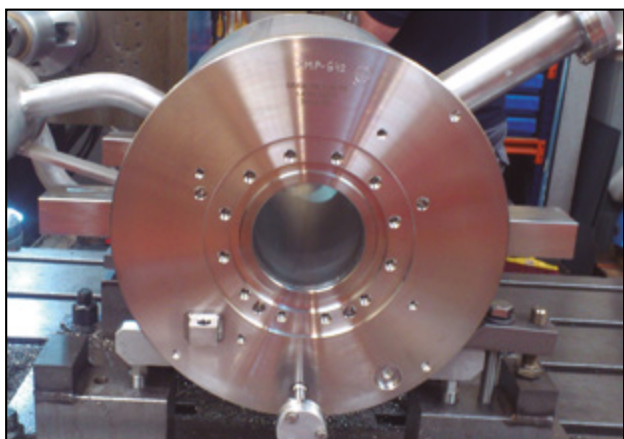


Figura 5b. Imán finalizado.

IFMIF

Dentro de nuestras contribuciones a grandes instalaciones, finalizamos con la correspondiente a la International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF).

Se trata de un acelerador lineal de 40 MeV, que acelera deuterones que bombardean un núcleo de litio para producir neutrones que se utilizan para irradiar los materiales a utilizar en el futuro primer reactor comercial de fusión DEMO y comprobar su comportamiento ante grandes dosis de radiación. Previamente se está construyendo una versión de validación que incluye un acelerador lineal de 9 MeV [20].

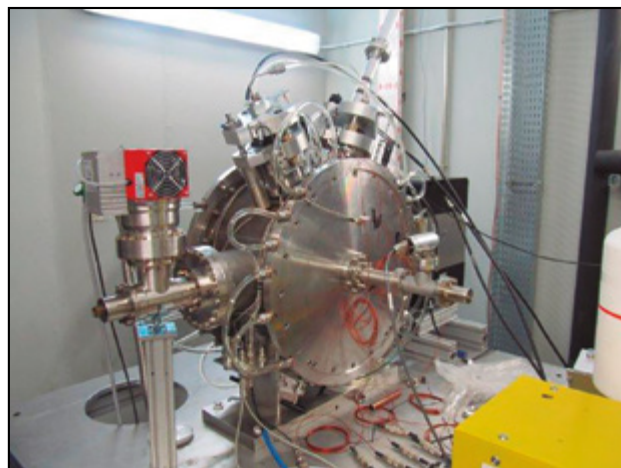


Figura 6. Cavidad tipo Buncher para IFMIF.

La participación en este proyecto ha sido también muy amplia y con gran aportación industrial: imanes resistivos y superconductores, sistemas de diagnóstico, componentes de intercepción del haz, etc. pero quizás el más destacado por su complejidad y por abrir una nueva línea de trabajo en el grupo, ha sido una cavidad de radiofrecuencia tipo buncher [21], cuya imagen aparece en la figura 6 y que ha sido íntegramente diseñada, construida y ensayada por el nuestro grupo, con alguna colaboración externa.

Además de estas contribuciones, que son las más significativas, el grupo ha participado en muchos otros desarrollos, en general de elevada complejidad tecnológica. Unos han sido también dentro del CERN como el desarrollo de tomas de corriente con superconductores de alta temperatura crítica y otros en diferentes instalaciones, como el diseño de multipletes superconductores para la Facility for Antiproton Ion Research (FAIR) o el del Next European Dipole para Fusión, diseño y fabricación de un imán combinado para el proyecto TESLA 500 (precursor de E-XFEL) o la participación en el detector AMS en la Estación Espacial Internacional.

4. EL DESARROLLO DE ACELERADORES PROPIOS

Antes de 2010, nuestro grupo ya había participado en la construcción de un acelerador completo, un microtrón para radiación intraoperatoria para el que se habían desarrollado las cavidades de radiofrecuencia (figura 1.b). Se trataba de un proyecto en colaboración con otros institutos y empresas y que estaba liderado por la Universidad Politécnica de Cataluña para hacer un acelerador de 12 MeV

a instalar en un brazo robotizado que irradiase electrones a tumores en pacientes, mientras estaban siendo operados en el quirófano [22].

Sin embargo, es a partir de 2010 cuando el grupo decide liderar el desarrollo integral de un acelerador completo. Se trataba de un ciclotrón superconductor compacto para la producción de radioisótopos (^{18}F y ^{11}C , principalmente) con los que luego fabricar los radiofármacos que se utilizan en el diagnóstico de enfermedades (tumores principalmente) mediante la llamada técnica PET (Tomografía por Emisión de Positrones).

Es una aplicación conocida desde hace tiempo y que cada día está más extendida. La novedad de nuestra propuesta consiste en usar un acelerador de dimensiones muy reducidas, que pueda ser utilizado en pequeños laboratorios o centros de investigación y que se basa en el mismo principio que su “gran hermano” el LHC. Recordando lo dicho en el punto 1, un campo magnético intenso permite acelerar partículas a gran energía con radios limitados, lo que es equivalente a decir que se pueden acelerar partículas a energía moderadas con radios muy pequeños y este es, precisamente, el principio de nuestro ciclotrón: utilizar un imán superconductor de alto campo para reducir el radio de la máquina y consecuentemente su volumen total [23].

El desarrollo se enmarcó como subproyecto dentro de una convocatoria CENIT, está liderado por el CIEMAT y a fecha de publicación de este artículo, se encuentra en fase de montaje de subsistemas: Por una parte se está terminando y empezando a ensayar el imán superconductor y por otra se están finalizando todos los componentes de la radiofrecuencia. Todos los elementos adicionales como la fuente de iones, el sistema de vacío, etc., también se encuentran en fase de fabricación o montaje.

Hay que resaltar que el sistema de refrigeración del imán superconductor es novedoso y se basa en su enfriamiento con helio bifase (gas y líquido) a 4,2K. El helio circula en circuito cerrado y un re-condensador basado en la utilización de un criorefrigerador, lo devuelve al estado líquido después de haber enfriado el imán. Se trata de una contribución del CERN al proyecto, que curiosamente 25 años después de que nuestro grupo colaborase en su acelerador LHC, participa en nuestro ciclotrón superconductor.



Figura 7b. Imán superconductor del ciclotrón.

5. FUTURAS ACTIVIDADES

Todo parece indicar que esta línea de actividad comenzada primero en el CEDEX y luego transferida al CIEMAT, pero siempre en estrecha colaboración entre ambos centros, tiene muchas posibilidades de continuar e incluso potenciarse a corto y medio plazo, tanto en la participación en grandes instalaciones internacionales, como en el desarrollo de aceleradores propios.

Dentro del primer grupo y además de los proyectos de futuro ya mencionados como CLIC o LHC HiLumi, existen otras dos grandes propuestas de futuros aceleradores/colisionadores de alta energía: Uno es el International Linear Collider (ILC), un linac superconductor en el rango de 1 TeV, proyecto en el que Japón ha mostrado gran interés por albergarlo y en el que el grupo viene participando desde hace varios años [24].

Otro es el Future Circular Collider (FCC) un colisionador hadrónico superconductor en el rango de los 100 TeV, que el CERN acaba de proponer como máquina gigantesca de largo plazo (alrededor de 100km de circunferencia) [25], y para el que el grupo ya ha empezado a trabajar.

En el campo de los aceleradores propios, la tarea más inmediata será la de comisionar el ciclotrón superconductor y empezar su operación, prevista en una instalación que se ha dispuesto en el CIEMAT. En función de los resultados, se analizará la estrategia de actuación y comercialización de este tipo de máquinas. También se están analizando proyectos de aceleradores para otras aplicaciones civiles.

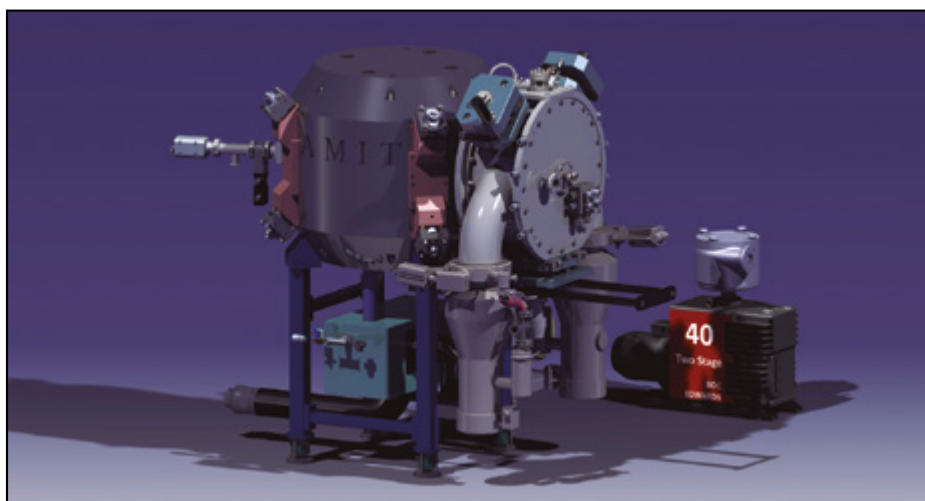


Figura 7a. Vista artística del ciclotrón completo.

6. REFERENCIAS

- [1] Amaldi, U. (2000). "The Importance of Particle Accelerators". EPAC 2000. Viena.
- [2] García-Tabarés, L. (2010). "Una Introducción a las Técnicas de Aceleración de Partículas y sus Aplicaciones". Master MINA. Ciemat.
- [3] Brown, I.G. (2004). "The Physics and Technology of Ion Sources". Wiley-VCH.
- [4] Wilson, E. (2006). "Introduction to Accelerators". Cern Accelerator School. Zakopane.
- [5] Le Duff, J. (2005). "Acceleration Techniques". Cern Accelerator School. Trieste.
- [6] Humphries, S. (1999). "Principles of Charged Particle Accelerators". John Wiley.
- [7] Marks, N. (2006). "Conventional Magnets for Accelerators". Cern Accelerator School. Zakopane.
- [8] Panofsky. (1997). "The Evolution of Particle Accelerators & Colliders". Beam Line. Spring .
- [9] García-Tabares, L., Toral, F. (2000). "España y los Imanes Superconductores". Mundo Científico. Noviembre.
- [10] Lee , S.Y. (2000). "Accelerator Physics". Indiana University.
- [11] Chao, A.W. y Tigner, M. (2006). "Handbook of Accelerator Physics and Engineering". World Scientific 2006.
- [12] Recuperado de <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>.
- [13] Perín, R., Siegel, N., Bidaurrezaga, H., García-Tabarés, L. (1992). "Design and Fabrication of the Prototype Superconducting Tuning Quadrupole and Octupole Corrector Winding for the LHC Project". IEEE Transactions on Magnetics, Vol 28, No1, Jan 1992.
- [14] Bajko, M., García-Tabarés, L. [et al.] (1998). "Training Study on Superconducting Coils of the LHC Sextupole Corrector Magnet". Proceedings of the European Particle Accelerator Conference. Estocolmo.
- [15] Recuperado de <http://hilumilhc.web.cern.ch/about/hl-lhc-project>.
- [16] Recuperado de <http://clic-study.web.cern.ch>.
- [17] Toral, F., García-Tabarés, L. [et al.] (2011). "Status of CIE-MAT Work on PETS". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Vol 657 pp 6-12.
- [18] Altarelli, M. [et al.] (2007). "The European X-Ray Free-Electron Laser" Technical Design Report DESY XFEL Project Group. Hamburgo.
- [19] Toral, F. [et al.] (2006) "Design and Calculation of a Superferric Combined Magnet for XFEL". Proceedings of EPAC 2006, Edimburgo.
- [20] Mosnier, A. [et al.] (2010). "The Accelerator Prototype of the IFMIF/EVEDA Project" Proceedings of IPAC 2010, Kyoto, Japan.
- [21] Podadera, I., Toral, F., Lara, A. (2011). "RF Design of the Rebuncher Cavities for the LIPAC Deuteron Accelerator". Proceedings of IPAC 2011, San Sebastian.
- [22] Kubyshin y. [et al.] (2009). "Current Status of the 12 MeV UPC Race-track Microtron" Proceedings of PAC09 (Particle Accelerator Conference 2009).
- [23] Oliver C. [et al.] (2013). "Optimizing the Radioisotope Production with a Weak Focusing Cyclotron," 20th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Vancouver.
- [24] Recuperado de <http://www.linearcollider.org>.
- [25] Recuperado de <http://cerncourier.com/cws/article/cern/56603>.