

# José Miguel Jiménez Carvajal\*

## EL IMPACTO EN LA INDUSTRIA DE LOS AVANCES TECNOLÓGICOS EN LOS CENTROS DE INVESTIGACIÓN DE FRONTERA DE LA CIENCIA. EL CASO DEL CERN

*El Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN), organismo intergubernamental, resulta un ejemplo claro y tangible de integración europea. Su estructura de gobierno y financiación le permite ocupar una privilegiada posición a nivel mundial en las áreas de la investigación en física básica, y apostar firmemente por la I+D y el mantenimiento y mejoras de infraestructuras. Esta estrategia asumida y sostenida le permite operar una red de infraestructuras de aceleradores, detectores y centros de computación sin equivalente a nivel mundial, y liderar, en colaboración con los institutos, universidades e industrias nacionales, proyectos y estudios que desafían conceptualmente varias áreas tecnológicas. El artículo reflexiona sobre las claves de su éxito y destaca algunos de los grandes retos que tiene por delante.*

**Palabras clave:** imanes, superconductividad, aceleradores, partículas, Hadrón terapia.

**Clasificación JEL:** D240, F680, I230, O310, O320.

### 1. Introducción

A principios de los años cincuenta y en el complejo contexto de la posguerra, destacados científicos europeos defendieron la creación de un centro de investigación y punto de encuentro para promocionar la ciencia. Este centro situaría a Europa a la vanguardia de la investigación en física básica y en particular en el campo de física de partículas y nuclear. El establecimiento

de un marco de paz para desarrollar la Ciencia permitió detener la continua fuga de cerebros.

La Organización Europa para la Investigación Nuclear (CERN)<sup>1</sup>, también conocido como el Laboratorio Europeo de Física de Partículas Elementales, 61 años después resulta un ejemplo claro y tangible de integración europea. Siendo su objetivo la física fundamental, y la búsqueda del origen y constituyentes últimos de la materia, a lo largo de los años y con mucha dedicación, el CERN y las universidades e institutos nacionales de investigación

---

\* Doctor en Ingeniería. Director de Tecnología del CERN.

---

<sup>1</sup> Para más información, ver [www.cern.ch](http://www.cern.ch)

han conseguido estrechar la colaboración para alcanzar descubrimientos científicos de primer rango, así como avances tecnológicos con gran impacto positivo en la sociedad. En 2013 Peter Higgs y François Englert recibieron el Premio Nobel de Física por el descubrimiento teórico del Bosón de Higgs, confirmado por experimentos en el CERN. Ese mismo año, el CERN había recibido el premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica.

## 2. El CERN ¿Un éxito europeo?

El CERN es en la actualidad la organización de investigación en física básica más importante del mundo. Sus instalaciones ocupan una superficie superior a 400 hectáreas en la región fronteriza franco-suiza de Ginebra. La organización emplea unas 2.300 personas, cubriendo las áreas de diseño, fabricación de prototipos, instalación, operación y mejoras de las infraestructuras de aceleradores y detectores. El personal de la organización también prepara, ejecuta, analiza e interpreta los datos de los experimentos científicos. Asimismo acoge de manera puntual, para permitirles investigar, a más de 12.000 científicos visitantes y usuarios procedentes de institutos y universidades de más de 70 países y con 120 nacionalidades diferentes. El CERN es fundamentalmente un conjunto interconectado de aceleradores de partículas<sup>2</sup> sin equivalente a nivel mundial. El mayor complejo de aceleradores y detectores en operación del mundo es un éxito europeo.

### Sus recursos

Las contribuciones anuales de los Estados miembros al CERN se hacen en efectivo. El presupuesto anual actual es de aproximadamente 1.000 millones de euros. Países no miembros han realizado importantes

contribuciones en especie, por ejemplo, los Estados Unidos proporcionaron componentes para el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) y sus detectores por un valor aproximado de 500.000.000 de dólares. Esta liquidez permite que la organización se haga responsable de una amplia gama de actividades y I+D en nuevas tecnologías de aceleradores y detectores, además de las interacciones a gran escala con la industria al gestionar directamente y con un modelo muy peculiar sus suministros.

La mayoría de su plantilla realiza tareas asociadas con la operación, mantenimiento y mejora de las infraestructuras existentes, así como labores de exploración tecnológica. Esa flexibilidad y personal altamente competente y experimentado es un gran activo de la organización, ya que permite hacer frente a necesidades operativas o de proyectos no previstas inicialmente, al mismo tiempo que resulta ser un aliciente para generar nuevas ideas y es un potente elemento de motivación; y un vector de maduración tecnológica para Europa y un centro de pruebas de las innovaciones generadas en esta área de la ciencia básica.

### Su especificidad

El CERN es un organismo internacional con estatus propio basado en un tratado intergubernamental. Es financiado principalmente a través de las contribuciones en efectivo de los Estados miembros y asociados. Funciona con una estructura de gobierno propia (comité científico, comité de finanzas y consejo) y una estructura administrativa y aduanera específica, ambos aprobados por los Gobiernos o parlamentos de los Estados miembros. El CERN es una institución intergubernamental pionera, altamente valorada por su contribución a la investigación científica y tecnológica y ha conseguido relevantes éxitos a pesar de su creación en la posguerra. Sus esfuerzos le han convertido en uno de los nodos centrales de una red de organizaciones dedicadas a la investigación participando, a nivel mundial, en intercambio de conocimientos, de métodos e infraestructuras de

<sup>2</sup> Más detalle sobre los aceleradores en <http://home.cern/about/accelerators>

investigación y en la diversidad cultural de la comunidad científica. Su reconocida experiencia en diseño, ejecución y explotación de instalaciones basadas en aceleradores le ha permitido establecerse como líder en un marco de colaboraciones con institutos y universidades de los Estados miembros a nivel mundial.

El CERN es considerado un *facility-scale experiments* o gran infraestructura de investigación, categoría que comparte con el futuro centro de fusión ITER o el Observatorio Astronómico Europeo (ESO). Existen otros modelos de infraestructuras de menor tamaño y cantidad de usuarios, por ejemplo el ESRF, el ILL, algunas ESFRI, etc.

Los detectores del CERN, instalados en los experimentos ATLAS, CMS, LHCb y ALICE son otra peculiaridad al ser jurídicamente independientes del CERN. Como socio y anfitrión el CERN contribuye financieramente y facilita las infraestructuras y servicios básicos de los experimentos aunque cada detector es objeto de una precisa negociación y de un acuerdo de colaboración. Más de 600 institutos y universidades de todo el mundo utilizan las instalaciones del CERN. Los organismos de financiación de los Estados miembros y no-miembros son responsables de la financiación directa o indirecta de la construcción y explotación de los experimentos en los que colaboran.

### 3. Ciencia básica ¿alternativa a un modelo determinista?

Desde la última reunión del comité de Estrategia Europea de Física de Partículas en 2006, el CERN ha centrado su labor en la comprensión de las leyes que gobiernan la naturaleza al nivel más fundamental y ha sido realizada con notable éxito. Cabe resaltar el descubrimiento del Bosón de Higgs que fue acompañado de muchos resultados experimentales, los cuales han confirmado el modelo estándar más allá de las escalas de energía previamente exploradas. Se han abierto nuevas interrogaciones sobre el origen de la masa de las partículas y el papel del Bosón de Higgs en el modelo estándar,

que puede involucrar a nuevas partículas adicionales que se descubrirían alrededor de la escala del TeV. Se están haciendo progresos significativos en dirección a la incomprensible asimetría materia-antimateria del Universo y la naturaleza de la misteriosa materia y de la energía oscura. Si bien la observación de un nuevo tipo de oscilación de neutrinos posibilita futuras investigaciones sobre la asimetría materia-antimateria en la física de los neutrinos. Perspectivas interesantes están surgiendo para experimentos que se relacionan con la física de astropartículas y la cosmología. Este excitante momento de la ciencia básica fue el escenario del establecimiento de las nuevas recomendaciones del comité de Estrategia Europea de Física de Partículas en 2014, comité compuesto por destacados expertos europeos<sup>3</sup>.

### La hoja de ruta del CERN

Las prioridades de la organización responden a las recomendaciones en base al potencial científico teniendo en cuenta la viabilidad técnica y la financiación con fondos propios del CERN —excluyendo contribuciones adicionales especiales de los Estados miembros—. Esta estrategia permite un funcionamiento seguro y fiable de los aceleradores, de las infraestructuras y de los servicios indispensables para la comunidad de usuarios, mediante una sólida política de mantenimiento y de consolidación.

El CERN tiene la I+D en aceleradores y detectores en su ADN y tiene aprobado, por su Consejo, un vibrante programa en ambos temas de aceleradores y detectores, fortaleciendo su papel en I+D a nivel europeo y mundial. El marco de estas iniciativas tecnológicas son el colisionador lineal compacto (CLIC) y el futuro colisionador circular (FCC), incluyendo este último el estudio del LHC de alta energía (HE-LHC) con imanes del FCC remplazando los del LHC y cubriendo perfectamente las opciones de la física de

<sup>3</sup> Recommendations of the European Strategy Committee. Ver anexo bibliográfico.

altas energías. Iniciará simultáneamente un proceso de evaluación, a nivel mundial, del potencial a medio y largo plazo de la cadena de aceleradores del CERN para estudiar y valorar opciones dentro de su programa de diversidad científica. Esa diversidad de programas científicos que complementará al de la física de altas energías, desata gran interés en la comunidad de físicos por su implícita capacidad para generar nuevos descubrimientos.

No obstante cada uno de ellos tiene una complejidad y escala de tiempo diferente. En la física de altas energías, y a largo plazo de cara a la era post LHC en 2035, el HE-LHC y CLIC o FCC serían las opciones posibles, con altísimos avances tecnológicos y desafíos de todo tipo. A medio plazo, 2025-2030, nuevas infraestructuras de blancos fijos o de neutrinos, más fáciles de alcance tecnológico. También se podría intercalar una opción intermediaria del LHC en 2025-2035 con colisiones de hadrones y electrones (LHeC). Hay que actuar potentemente para preparar el futuro.

#### *LHC y HL-LHC El Gran Colisionador de Hadrones de alta energía ¡Prioridades absolutas!*

El LHC, cuyos excepcionales resultados han proporcionado, en cantidad y en calidad, datos muy superiores a los inicialmente previstos, llevó al CERN y a sus socios de los detectores del LHC al descubrimiento del Bosón de Higgs anunciado el 4 de julio de 2012. El LHC va a mantener sus condiciones de funcionamiento, con un incremento gradual de la intensidad de los haces hasta finales de 2018 cuando se detendrá para llevar a cabo una parada técnica cuya duración aproximada es de 18 a 24 meses. Tras esta parada, el colisionador será capaz de operar a su máxima energía de 14 TeV en el centro de masa o punto de colisión, a su máxima intensidad y luminosidad (indicador de la cantidad de colisiones por unidad de tiempo). Durante esta parada técnica del LHC, los detectores serán actualizados y mejorados, lo que aumentará la capacidad de detección, resolución y tratamiento simultáneo de los datos

de las colisiones. Cuando el LHC reanude su operación en 2021, lo hará con detectores casi nuevos.

En el horizonte de 2023, el CERN tiene previsto modificar notablemente los elementos más críticos del acelerador por ambas partes de los dos grandes detectores ATLAS y CMS. En total, más de 1,5 km del acelerador será totalmente reconfigurado, reemplazando los componentes existentes por nuevas tecnologías de vanguardia con el objetivo de incrementar la luminosidad para multiplicar por 100 la cantidad de datos acumulados de cara a 2035. Aprovechar al máximo el potencial del LHC y de su alta luminosidad (HL-LHC) es la prioridad absoluta del CERN.

#### *Diversidad científica para una comunidad más amplia...*

Al margen de la física de altas energías, el CERN mantiene desde hace muchos años un programa científico, alternativo, complementario y muy dinámico. Los más conocidos son los programas de física con haces impactando blancos de diversas geometrías y materiales, por ejemplo en la Zona Norte tanto en física nuclear como en física de antimateria con experimentos únicos<sup>4</sup>.

El CERN responde a las necesidades de investigación experimental aprovechando sinergias, potenciando los experimentos existentes, las instalaciones relacionadas con los diferentes aceleradores, las zonas experimentales y sus mejoras y con nuevas iniciativas como el anillo de almacenamiento de antimateria cuya instalación en el CERN se está valorando. Así mismo, prepara su participación en proyectos de neutrinos fuera de Europa a través de su plataforma de neutrinos y actividades en detectores e instrumentación. El CERN pretende contribuir tecnológica y científicamente en esta área, con fuerte potencial de descubrimientos, y servir de punto de encuentro para la comunidad de neutrinos europea y ser puente de Europa con las iniciativas desarrolladas en Asia y EE UU<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Ver <https://greybook.cern.ch/greybook/index.gsp>

<sup>5</sup> Presentación de F. GIANOTTI, directora general del CERN al Comité Científico, marzo 2016.

## España @ CERN

España en su calidad de quinto país contribuidor del CERN mantiene una presencia equilibrada tanto en personal de plantilla y estudiantes como en retornos industriales y de servicios. Los técnicos, ingenieros y científicos españoles han desempeñado un papel fundamental en el éxito del LHC, y se sienten orgullosos de haber contribuido al experimento científico descrito como el más audaz emprendido en la historia humana y la flor del nuevo renacimiento europeo, y de pertenecer a un país actor principal de la ciencia mundial, lo que sin duda alguna, es una asociación de beneficio mutuo.

En lo que se refiere a la contribución científica española al CERN, el CPAN<sup>6</sup> apuntaba, con vistas a la preparación de la contribución española a la estrategia europea: «más de 200 investigadores españoles, incluyendo físicos, ingenieros y técnicos, pertenecientes a diez institutos y universidades, están comprometidos en los programas de actividades LHC que están financiados mayoritariamente por fondos de programas nacionales y europeos para la investigación fundamental». Conviene destacar que las dificultades económicas de estos últimos años han generado una bajada del número de usuarios procedentes del tejido universitario español.

Las dos comunidades principales son la de física de altas energías y la de física nuclear. Estas actividades incluyen el diseño de detectores, la fabricación, la puesta a punto, instalación y operación así como la computación asociada (notablemente la computación *Grid*). España y el CERN son socios importantes en programas europeos como EUCARD y TIARA, que representan oportunidades para reforzar actividades de I+D con numerosas aplicaciones derivadas importantes, no solo en la física de altas energías sino también en el campo de la física médica.

<sup>6</sup> Centro Nacional de Física de partículas, Astropartículas y Nuclear  
<https://www.i-cpan.es/noticias.php>

La comunidad española y su industria ya están preparando la siguiente etapa, un futuro comparable al de su contribución inicial al LHC. Esto supone una participación activa en el desarrollo de alta luminosidad del LHC pero también en los avances tecnológicos del estudio CLIC (instrumentación de haces, cavidades radiofrecuencia, sistemas electrostáticos pulseados) o del estudio FCC, con importantes responsabilidades en imanes superconductores y cámaras de vacío para los haces de alta energía e intensidad. En el campo de los detectores, dos de las especialidades son los componentes de detección de tipo pixel y las cámaras de muones, que representan ejes de desarrollo prioritario. Estas colaboraciones en estudios complementan las necesidades de operación de los detectores y aceleradores del LHC y permiten a institutos y universidades preservar la talla crítica para permanecer competitivos, y a la industria competir en contratos para mantener su tejido técnico y de producción.

## 4. El modelo tecnológico del CERN

### ¿Un éxito extrapolable?

Este modelo se ha construido a lo largo de los últimos 61 años como resultado de una aproximación pragmática de las necesidades de la organización y de la evolución de los organismos de investigación nacionales, públicos o privados, y del profundo cambio sufrido por la industria en estas dos últimas décadas:

— Adaptarse para sobrevivir parece una necesidad lógica del mundo económico en continuo movimiento, pero en el caso del CERN resulta aún más vital. Resulta imprescindible mantener con índices de operatividad altísimos las infraestructuras existentes. Al mismo tiempo su futuro depende de su capacidad de innovación técnica en ámbitos de tecnologías de aceleradores y detectores. Su posicionamiento estratégico se basa en apostar por infraestructuras de grandes dimensiones, punteras y en muchos casos únicas en el mundo.

— Saber preservar sus ventajas competitivas inyectando los recursos humanos y financieros necesarios

a la operación, el mantenimiento y las mejoras de las infraestructuras existentes. La posición única del CERN a nivel mundial se debe, como hemos comentado, a su acertada estrategia de preservación y acumulación de gran variedad de aceleradores e infraestructuras asociadas. El CERN asumió muy pronto, por el impacto financiero y humano que ello representaría, no mantener nunca infraestructuras obsoletas por recortes en inversión. De ahí procede, en parte, su estrategia de mantenimiento y mejora, que en algunos casos lleva a retrasar algunas propuestas o proyectos. El mantenimiento y mejora es una prioridad absoluta.

— Convencer es la única opción viable para permanecer en la vanguardia de la física de altas energías y nuclear. Una vez establecida la estrategia del CERN, es esencial establecer colaboraciones con institutos y universidades de los Estados miembros y, cada vez más, a nivel mundial, para compartir el esfuerzo en I+D y estimular el desarrollo tecnológico al provocar un grado razonable de competición.

— Co-competición, una mezcla equilibrada de colaboración y competición, es la principal característica de la estrategia de la organización y explica el marco de sus relaciones a nivel internacional. Siguiendo las recomendaciones del comité estratégico europeo, y como complemento del esfuerzo humano y financiero desarrollado, un reforzamiento de las colaboraciones resulta imprescindible para el desarrollo en el futuro.

— Asociaciones estratégicas con otros proyectos que comparten similares desafíos tecnológicos e industriales. Por ejemplo, el centro de fusión ITER, con la problemática de los cables superconductores e integración de sistemas, y los aceleradores de luz sincrotrón al compartir problemáticas cercanas a las del FCC. Compartir problemas y trabajar juntos, de todo y de otros siempre se aprende.

— Visión y flexibilidad proyectándose estratégica, científica y tecnológicamente a diez años, e imponiéndose una cuota de personal en rotación del 20 por 100 —con ajustes específicos dependiendo de las áreas y dificultades de contratación del personal

experto— para mantener un margen suficiente de flexibilidad.

Pero el análisis sería incompleto sin recordar un aspecto particular del CERN, su financiación en efectivo. Ese factor es fundamental para el funcionamiento de su modelo y ha contribuido notablemente al éxito de la organización a lo largo de los años. Las relaciones con la industria se desarrollan dentro de un marco económico, jurídico y de ejecución muy particular, específico al CERN y al mundo de los aceleradores.

### Una estrategia específica

¿Cómo garantizar opciones de futuro del CERN? ¿Cómo mantener y mejorar las infraestructuras existentes? ¿Qué esfuerzo humano hay que dedicarle? ¿Y la motivación del personal? ¿Cuáles son las posibles opciones para reducir los riesgos durante el proceso de innovación tecnológica? ¿Qué estrategia para la optimización de costes, plazos y transferencia de tecnología? Etcétera. Son preguntas recurrentes en los debates estratégicos.

Con los años, los líderes del CERN han desarrollado sus propias respuestas a estas preguntas en función de los desafíos y oportunidades específicas que han ido encontrando. Este largo proceso de aciertos y reflexiones ha dado como resultado una estrategia propia y probablemente no válida universalmente, pero las resoluciones adoptadas tienen resultados tangibles y, en cuanto al nivel de motivación de la plantilla, han conseguido generar un espíritu corporativo muy potente. Esta estrategia debe de ser flexible y adaptable, considerando que los plazos entre el inicio de estudio de un acelerador y la realización de prototipos son de unos diez años, a los que hay que añadir otros diez años para llegar a la fase de la operación de la nueva infraestructura.

Algunas reflexiones vigentes: ¿qué proceso implementar para aprobar nuevas iniciativas científicas? ¿cómo garantizar la más alta calidad en I+D y fabricación cuando las reglas comerciales favorecen la

oferta más baja? ¿y la búsqueda del justo retorno a los Estados miembros? ¿debe mantenerse el acceso abierto a todas las tecnologías e información? ¿puede una infraestructura ayudar directamente a sus Estados miembros? ¿en qué medida y de qué manera puede una infraestructura perseguir objetivos socialmente beneficiosos pero distantes de su principal objetivo científico, sin perjuicio? En los próximos subapartados se desarrollaran las respuestas del CERN a cada una de estas reflexiones.

### Índices operativos ¿realismo y pragmatismo?

A lo largo de los años el CERN ha diseñado, instalado y operado una gran variedad de aceleradores, detectores e infraestructuras asociadas. Sin duda alguna la más amplia gama de aceleradores y detectores del mundo. Esta espectacular realidad es el resultado de una fuerte voluntad sostenida de invertir en el mantenimiento de las infraestructuras, con una gran variedad de diseño y de edad de los componentes existentes (promedio de más de 20 años). Alcanzar máximos índices operativos es un objetivo permanente a todos los niveles de la organización, y que se comprueba día a día en un entorno de dificultad. El alto índice operativo del LHC, último acelerador de la cadena, depende fuertemente del índice de todos sus inyectores, que permiten preacelerar los haces de partículas. Para garantizar un índice de disponibilidad del LHC superior al 60 por 100, los elementos de la cadena de aceleradores, a pesar de los años de operación, deben sobrepasar el 90 por 100 de índice operativo, nivel altísimo si se tiene en cuenta la complejidad, variedad e interconexión de los sistemas.

Operar y mantener estos sistemas implica una visión realista y pragmática de la situación para adaptar la plantilla y los esfuerzos a diversas situaciones. El éxito del CERN se basa en su personal, altamente cualificado, motivado y con un espíritu corporativo sin equivalente. Esto ha permitido resolver situaciones complejas en un lapso de tiempo mínimo gracias al

esfuerzo y dedicación del personal. Las situaciones críticas son analizadas a *posteriori* para prevenir que no se repitan —factor de desmotivación—, y se trabaja constantemente, mediante un plan quinquenal, en la preparación de un plan de personal que garantice la transferencia del saber y la experiencia así como el desarrollo profesional del personal clave. El reparto de la plantilla se mantiene, por voluntad explícita, en un tercio de ingenieros y físicos, un tercio de ingenieros técnicos y un tercio de técnicos. Además reciben apoyo técnico de mantenimiento básico vía contratistas en apoyo industrial.

### Preservación del capital humano y financiero ¿una apuesta ganadora?

El ambiente intelectual en los laboratorios de física de alta energía es altamente estimulante, y se asemeja probablemente a la relación entre los institutos y universidades y las empresas innovadoras de alta tecnología. Este ambiente corporativo, muy potente, se puede observar en todas las fases críticas de la vida del CERN, como por ejemplo cuando un nuevo acelerador está siendo diseñado, cuando comienzan las operaciones con haces o cuando hay un incremento significativo de los parámetros del haz (por ejemplo, la energía o la luminosidad). Es especialmente remarkable la capacidad de la organización para superar situaciones difíciles, debido principalmente a la gran fluidez en el intercambio de ideas y de información. El personal del CERN busca producir resultados de manera rápida y eficaz interiorizando los estándares científicos y técnicos más exigentes. El espíritu de equipo prevalece sobre la ambición personal, y el mérito, medido por resultados concretos, es reconocido tanto a nivel individual como colectivo.

Este entorno de excelencia y alto nivel favorece el desarrollo de la carrera personal en un ámbito colectivo, tanto en términos de la absorción de conocimientos y experiencias, como en el aprendizaje de la colaboración en equipo hacia el logro de objetivos comunes,

tomando en cuenta los desafíos introducidos por las otras tecnologías. Muy pocos de los científicos, ingenieros y técnicos del CERN pueden desarrollar una carrera de forma aislada. Esto es especialmente —y cada vez más— igual en el caso de los físicos que son miembros de las grandes colaboraciones en los detectores.

Hay otros factores aún más específicos al CERN como la gran variedad cultural y los diversos aspectos tecnológicos en un entorno semi-industrial, donde se combinan varios desafíos como pueden ser la integración de los sistemas en túneles, la presencia de radiación, la falta de espacio para los servicios técnicos y transporte, los efectos inducidos por los campos magnéticos y las interferencias electromagnéticas, etcétera. Integrar esos requisitos en un diseño específico a una tecnología es un factor estimulante del conocimiento. De nuevo aparece la noción muy peculiar de co-petición. Los técnicos, ingenieros y físicos tienen que competir manteniendo un alto nivel de colaboración, lo que garantiza una exitosa integración de todo el sistema. La gestión combinada de la operación y de la consolidación de las infraestructuras es un ejemplo de manual. Esta estrategia permite mantener un personal altamente cualificado en tareas de operación, al mismo tiempo que el desarrollo de I+D e implementación de mejoras tecnológicas en los aceleradores y detectores existentes supone una gran motivación. Una tasa de rotación muy baja de la plantilla de operación aporta una gran estabilidad, y genera un mejor funcionamiento de los aceleradores permitiendo dedicar más tiempo a tareas de desarrollo tecnológico. Otro aspecto a destacar de la consolidación de los aceleradores, detectores e infraestructuras es la retroingeniería, o cómo reconstruir un componente cuyo diseño o tecnología es obsoleto, lo cual requiere un nivel muy alto de integración de varias tecnologías. Esta labor es muy estimulante en términos intelectuales y tecnológicos, en particular cuando se le asocia la interacción con la industria para la producción y testado de los prototipos y componentes de serie. Un proceso de maduración tecnológica fascinante. ¡O

cómo mantener infraestructuras sin equivalente en el mundo de más de 20 años de promedio con una motivación sin fallos!

Las actividades al margen de la misión principal del CERN son también importantes factores de motivación, y en algunos casos con aportes muy significativos para la sociedad. Por ejemplo, el tratamiento del cáncer con terapia de hadrones fue un logro desarrollado en el CERN que no formaba parte de los principales objetivos científicos de la organización, pero ilustra perfectamente su capacidad de generar beneficios para la sociedad sin desviarse de su misión principal. La cultura del trabajo y la flexibilidad permiten a los miembros del personal utilizar parte de las infraestructuras del CERN (dentro de unos límites razonables) para explorar nuevos conceptos o ideas. El CERN funciona también como incubadora de importantes estudios o proyectos nacionales.

### **Control del riesgo: modelo integrado ¿factor de éxito?**

Desde hace años el CERN ha optado por una aproximación de máxima integración de sus actividades, desde el diseño de los componentes de los aceleradores y detectores, pasando por el prototipado y producción en serie en estrecha colaboración con la industria, a la instalación, puesta en servicio, operación y mantenimiento, incluyendo posibles mejoras a lo largo de la vida de la infraestructura. Este modelo de máxima integración, poco común, requiere una estrategia muy dinámica de I+D para equilibrar el coste económico que, de no ser compensado por una participación en otras actividades, sería difícil de justificar. Una política de máxima integración debe ser controlada desde el exterior por comités de ingenieros y físicos independientes para minimizar los riesgos tecnológicos y económicos. ¡Y por eso el modelo integrado ha desaparecido progresivamente del tejido industrial!

El éxito del CERN reside en su plantilla de primer rango en todas las especialidades que integran el corazón

del acelerador y sus detectores. Esa disponibilidad permite intervenir y resolver problemas muy complejos en pocas horas, sin depender de recursos externos. El núcleo de expertos es el que hace el diseño detallado de los componentes del acelerador, de su integración y puesta en operación. El síndrome de «paternidad» es altísimo y contribuye al sentimiento de responsabilidad técnica en caso de fallo o avería.

### *Margen de flexibilidad*

La capacidad del CERN para llevar a cabo internamente grandes esfuerzos de innovación tecnológica relacionados con el diseño, desarrollo y fabricación de componentes esenciales de su infraestructura de investigación, se debe a una serie de apuestas estratégicas pragmáticas. La masa crítica de empleados le permite dar cabida a las distintas etapas de estudio de proyectos, sin perjuicio para los ya autorizados y financiados. Su personal experto y con amplias conexiones a nivel internacional tiene las capacidades de estudio y diseño, y se beneficia de un entorno estable a medio y largo plazo que le permite valorar todas las opciones al margen de su misión primera, fundamentalmente relacionada con la operación y consolidación de infraestructuras existentes. Finalmente, el CERN dispone de otro eje de flexibilidad, probablemente entre los más potentes ¡la posibilidad de adaptar las prioridades de la organización a los resultados de la física!

### *Riesgos financieros y tecnológicos*

La estrategia del CERN reside en la limitación de los riesgos financieros y tecnológicos con una política de máxima integración, asumiendo responsabilidades de diseño y procesos de fabricación, y con interacción con la industria desde el diseño, pasando por los prototipos y hasta la etapa final de fabricación, manteniendo una política de máxima presencia y ejecutando el control de calidad. En sus contratos, su grado de flexibilidad en los procedimientos internos de contabilidad, de

gestión y de compras, le permite imponer altos niveles de interacción y la capacidad para establecer un fuerte control y supervisión de sus socios. Al limitar las contribuciones en especie, se tiene además más libertad para especificar el grado de control y de calidad que se desea imponer en el concurso de ofertas. A medio y largo plazo esa relación directa con los proveedores —indirecta en el caso de las contribuciones en especie— impone altos niveles de calidad y un mejor control de los costes y fechas de entrega. El no respeto de las reglas internas de la organización, supone la descalificación del suministrador en futuras ofertas. Se puede incluso, en algunos casos, delegar a asesores externos parte de los controles de los proveedores y subcontratistas. ¡Integración y controles son la norma!

La etapa de prototipos y de testado en colaboración con la industria, y en muchos casos utilizando infraestructuras del CERN, es uno de los momentos decisivos para el ajuste de los riesgos reales tecnológicos y económicos. En ese momento, el CERN convoca un comité internacional de expertos para valorar el diseño, etapas de fabricación y comportamiento de los prototipos. Esas recomendaciones suelen conllevar procesos de optimización así como algunos cambios cuyo impacto se negocia con la industria. Si se analiza el proyecto LHC, conforme a la estrategia explicada anteriormente, no resulta sorprendente que casi todo el valor añadido se produjera en el CERN. En un principio los expertos del CERN identificaron las características tecnológicas únicas de los componentes principales y luego se establecieron de manera sistemática todos los retos tecnológicos e industriales. Sin duda alguna las exigencias técnicas, plazos de entregas y de control de costes impusieron al personal del CERN el mantenimiento de la responsabilidad aun habiendo algunas empresas con relevante experiencia en el sector, como por ejemplo para la fabricación de los imanes dipolos superconductores, ya que no hubiesen tenido las capacidades que les hubiese permitido hacer una oferta de un contrato con todo-incluido. Es más, de haber tenido esa capacidad, el incremento del esfuerzo en I+D y los riesgos

tecnológicos e industriales hubiesen generado un coste prohibitivo y el CERN no hubiese aceptado el riesgo asociado. ¡Era la única estrategia compatible con la gestión de riesgos adecuada!

Mantener plazos implica, en algunos casos, evitar cualquier posibilidad de verse obligados a participar en procesos judiciales con los contratistas en dificultades técnicas o económicas. Incluso teniendo fuertes garantías de ganar el pleito, los retrasos podrían peligrar los objetivos científicos generales, y sin garantía alguna de recuperar los costes. La estricta supervisión, incluyendo el despliegue de recursos internos para solucionar problemas durante la fase de producción, forma parte de la estrategia de la organización. En contextos difíciles, el CERN implementa recursos suplementarios para adelantar la detección de cualquier incidente, o bien formar al personal de la empresa y mejorar la metodología, e incluso en casos extremos se adapta el proceso de fabricación al entorno industrial para minimizar los retrasos y el impacto financiero.

Finalmente, una rigurosa validación de los cambios de diseño, de utillaje o incluso de detalles de fabricación forma parte de la exigencia de calidad. No obstante, este modelo tiene un inconveniente mayor: las grandes empresas industriales con capacidades de I+D y de diseño integradas se suelen quedar al margen de estas oportunidades comerciales. Su modelo económico e industrial necesita un alto margen de beneficio y asumen que el diseño forma parte íntegra de la oferta. Obviamente es un modelo poco adaptado a la estrategia del CERN, más en sintonía con la pequeña y mediana empresa de tecnologías de vanguardia.

#### *Relaciones con la industria ¿cliente, proveedor o experto?*

Debido a que el CERN es una organización internacional intergubernamental, tiene libertad para definir los principios y procedimientos de compras sin tener que cumplir con todos los requisitos de los Estados

miembros. Estos principios y procedimientos son especialmente importantes para la organización, al permitirle realizar la compra a través de convocatorias de competición abiertas y la adjudicación de contrato a la oferta más barata, independientemente de su nacionalidad, siempre y cuando se cumplan los requisitos de calidad y rendimiento establecidos. Adjudicar contratos utilizando el método de mejor relación calidad-precio es una nueva estrategia que se introdujo hace pocos años para compensar desequilibrios de costes introducidos por la liberalización del comercio dentro del espacio económico europeo. El precio no puede siempre ser el factor decisivo, en algunos casos los criterios de calidad deben primar. Conviene también resaltar el valor añadido de la gran flexibilidad de los contratos de servicios en el CERN. ¡El cliente es el que decide, y en este caso, el que establece las reglas!

El CERN acompaña a sus proveedores en los momentos críticos para solucionar los problemas inherentes a la industrialización de la I+D. Otras veces son los institutos y universidades los que en algunos casos ayudan al CERN en esa labor de acompañamiento de la industria, promocionando un modelo colaborativo para disminuir los riesgos tecnológicos y financieros. Los requisitos de este tipo de investigación van a veces más allá del estado actual de la tecnología, y los expertos de la organización necesitan innovar y anticipar las opciones y factibilidad de la industrialización para poder alinearse en caso de aprobarse el proyecto. ¡Invertir para ver y ser visto es imprescindible!

Algunas veces el CERN suministra a la industria parte del material básico (materiales y aleaciones, aislantes de alto rendimiento, etc.) y componentes de alta tecnología (cables superconductores, ensamblajes de semiconductores de potencia, tarjetas electrónicas, etc.) para limitar el riesgo (costes y plazos) y garantizar una calidad de alto nivel. La organización se convierte en proveedor.

Como ya se ha descrito, los dirigentes del CERN favorecen una estrategia muy centralizada que conserva la responsabilidad, la toma de decisiones y el

control directo de las funciones críticas de programación, compras, fabricación, montaje y pruebas. ¡Es claramente un rol de experto!

Puede resultar extraño pensar que también sea necesario convencer a las empresas para que colaboren con un organismo cuya imagen de excelencia resalta más allá del continente europeo, pero las características del mercado de los instrumentos científicos tienen sus peculiaridades. La gran mayoría de estos instrumentos son financiados casi siempre con fondos públicos y generan un mercado de nicho de alta tecnología, exclusivo, muy dinámico pero con altos riesgos técnicos y económicos. El CERN se adapta continuamente a esta dificultad y a los efectos colaterales que puede generar una situación de crisis financiera, como por ejemplo las restricciones de líneas de crédito o de garantías bancarias.

### Una agresiva política de I+D ¿motor del éxito?

La I+D en tecnologías relacionadas con los aceleradores y los detectores es fundamental para el CERN y siempre ha mantenido su prioridad. Para mayor eficiencia, el CERN favorece una estrategia que combina I+D en el marco de un proyecto con I+D más conceptual. Ambas permiten investigar de forma eficiente las diferentes opciones y generar ideas innovadoras que se concretan a través de prototipos de vanguardia. Este modelo se viene aplicando a la política de I+D de cables superconductores, sistemas de vacío, convertidores de potencia, distribución eléctrica, optimización energética, y electrónica de detectores. Es una estrategia que permite liberar la creatividad e investigar oportunidades de innovación tecnológica sin alejarse drásticamente de las posibles aplicaciones. La fabricación de prototipos permite confirmar el potencial de dicha I+D.

Si, en el curso de su misión científica, el CERN detecta la necesidad de crear componentes cuyos parámetros tecnológicos exceden el estado de conocimiento actual en dicha tecnología, se emprende un concienzudo plan de I+D en colaboración con institutos

y universidades de los Estados miembros. La industria debe asociarse cuanto antes para evaluar la mejor estrategia y reducir el riesgo durante el proceso de innovación, así como preparar la estrategia adecuada para la optimización de costes, plazos y transferencia de tecnología a los socios industriales. Anticipación y preparación son los *leitmotiv* de la I+D.

### I+D en aceleradores ¿o cómo gestar opciones?

El CERN ha establecido una estrategia muy precisa para su I+D, que se ha definido utilizando todas las líneas presupuestarias. De ahí las siguientes áreas prioritarias:

— *Imanes superconductores de alto campo magnético*, con un primer objetivo de 16 teslas utilizando nuevos cables superconductores de baja temperatura (LTS) con aleación de niobio-estaño ( $Nb_3Sn$ ), y un segundo objetivo más ambicioso de hasta 20 teslas, basado en una estructura híbrida con cables superconductores de baja temperatura de niobio-titanio ( $NbTi$ ) y niobio-estaño ( $Nb_3Sn$ ) combinados a cables superconductores de alta temperatura (*high temperature superconductors*, HTS), por ejemplo de boro-magnesio ( $MgB_2$ ).

— *Cavidades aceleradoras superconductoras de alto rendimiento energético y alto gradiente de aceleración*, estructuras y métodos de aceleración alternativos de alto gradiente. Dependiendo de la frecuencia de funcionamiento, el CERN ha decidido proseguir estudios de cavidades superconductoras siguiendo dos tecnologías complementarias: cavidades de cobre con una capa interna superconductora de niobio para las cavidades de frecuencias inferiores a 800 MHz; y cavidades de niobio macizas para frecuencias superiores a 800 MHz. Ambos estudios pretenden mejorar el rendimiento energético y el gradiente de aceleración mediante procesos de enriquecimiento por plasma de las capas superficiales. También como solución alternativa de aceleración de muy alto gradiente para electrones y positrones, estructuras de aceleración con haz paralelo (CLIC) con el estudio CLIC y métodos

con plasma (AWAKE). Obviamente incluida la correspondiente I+D en fuentes de radiofrecuencia de alta potencia y alto rendimiento.

— Tecnologías especiales que necesitan iniciativas innovadoras para responder eficazmente a las necesidades de la futura generación de aceleradores. Estamos hablando de elementos que puedan inyectar, extraer e interceptar haces de muy alta intensidad y energía ¡hasta diez veces más potentes que en el LHC! Y otras tecnologías como la criogenia y el vacío que necesitan saltos cuánticos en rendimiento y coste, así como una fiabilidad muy alta para las tecnologías de protección de los imanes superconductores.

— Resistencia de los componentes electrónicos y sistemas a las radiaciones, así como la alternativa que representa medir la tolerancia de los componentes y sistemas comerciales a la radiación. Son dos áreas fundamentales de cara al futuro, en particular, considerando la miniaturización de la electrónica. Los componentes resistentes a la radiación podrían resultar fuera de alcance económico.

El CERN ha establecido importantes acuerdos de colaboración con los institutos y universidades de los Estados miembros y con países colaboradores a nivel mundial para afrontar estos desafíos en I+D. En el caso de España conviene resaltar la participación del CIEMAT y del sincrotrón ALBA en el proyecto HL-LHC y los estudios CLIC y FCC. ALBA lidera incluso el estudio del concepto de la cámara de vacío dentro de la colaboración EuroCirCol para el haz del FCC.

### *I+D en detectores ¡otro mundo tecnológico deslumbrante!*

Los cuatro grandes detectores del LHC funcionan de un modo similar, aunque cada uno emplea diferentes tecnologías para favorecer la detección de mecanismos de desintegración diferentes. Esa complementariedad permite comprobaciones independientes de cualquier nuevo descubrimiento, así como el desarrollo de una gran variedad de nuevas tecnologías que

encuentran, además, aplicaciones en otros campos de la ciencia.

La priorización de la I+D en el ámbito de las tecnologías de los detectores sigue un proceso conocido como el «caos determinista». Caos porque al iniciar este proceso de reflexión tecnológica hay un amplio margen de innovación; «determinista» porque el objetivo está claramente identificado. Es un proceso peculiar que permite la generación de ideas sin perder el objetivo y calendario. Este proceso de democracia participativa permite, una vez decidido qué tecnologías se instalarán en el detector, alcanzar un alto nivel de colaboración por parte de la comunidad y un reparto equitativo de responsabilidades y ejecución altamente valorado por los equipos que tuvieron que renunciar a sus propuestas.

Por otra parte, la I+D realizada en marcos bien definidos, a menudo establecidos o monitoreados desde el CERN, proporcionan muchos beneficios a las instituciones colaborando con el CERN. Una I+D significativa es necesaria para aportar nuevos conceptos de detectores en un estadio en el que son lo suficientemente maduros para ser propuestos como parte de un experimento futuro. Los proyectos de I+D comunes permiten compartir recursos en la fase inicial de desarrollo, acumular talento y experiencia, y facilitar la participación de la industria en la creación de prototipos y el desarrollo desde una etapa temprana. Además, estos proyectos representan una excelente formación y oportunidades para los jóvenes estudiantes e investigadores.

Y es un proceso que se repite. En la segunda fase del programa de física del LHC, los experimentos deberán abordar el envejecimiento de los actuales detectores y mejorar la capacidad de aislar y medir con precisión los productos de las colisiones más interesantes. Los principales retos que deben superarse para lograr este objetivo son los daños por radiación de los componentes y su capacidad para distinguir sucesos superpuestos en los detectores. La mayor cantidad de sucesos y su mayor tamaño serán un reto para los sistemas de disparo (*trigger*) —el mecanismo de sincronización

del flujo de datos con la estructura del haz de hadrones— y adquisición de datos (DAQ), lo que requerirá una expansión importante de su capacidad.

Los cuatro experimentos requerirán nuevos detectores de trazas, los más cercanos al punto de colisión y por tanto más expuestos a la radiación. Se necesitarán sistemas con mejor capacidad para registrar partículas, mayor precisión espacial y temporal y mayor tolerancia a la radiación que los actuales. Se proponen sistemas con sensores de silicio, píxeles activos monolíticos (MAPS-CMOS), tecnologías más avanzadas que integran microelectrónica y técnicas de montaje 3D, el enfriamiento de los sistemas con dióxido de carbono y estructuras mecánicas ligeras que integran al máximo los servicios necesarios para la operación de los detectores. Varios aspectos, tales como el desarrollo de sensores y electrónica resistentes a la radiación, su refrigeración, y el desarrollo de tecnologías de interconexión, están sujetos a actividades de I+D conjuntas.

Los calorímetros proporcionan información esencial sobre la energía de las partículas, su identificación, y son vitales en los sistemas de disparo de todos los experimentos del LHC. El entorno del HL-LHC impone algoritmos de disparo más selectivos y sofisticados basados en alta granularidad y alta precisión. Esto requiere mayor ancho de banda y latencia más larga de los sistemas de lectura, por lo que una nueva electrónica está siendo desarrollada. La evolución de los sistemas de lectura de los calorímetros muestra elementos comunes en los cuatro experimentos. ¡Pero LHCb prevé además un sistema de disparo basado completamente en *software*, utilizando la lectura completa de todos los subsistemas del detector con una cadencia de 40.000.000 por segundo (40 MHz)!

Hay una gran variedad de tecnologías utilizadas en los sistemas de muones de los experimentos del LHC, pero tienen muchos aspectos en común. Casi todos ellos son detectores gaseosos, ya sea utilizando cables (cámaras de deriva e hilos) o sin cables (cámaras planas resistivas - RPC). Los detectores de muones de los cuatro experimentos del LHC han demostrado

un excelente rendimiento durante la primera fase del LHC. Con los aumentos previstos en la luminosidad, tendrán que hacer frente a un ruido de fondo —radiaciones indirectas generadas por el haz de protones— mucho mayor, aumentando las inquietudes sobre su vida útil y rendimiento, lo que justifica plenamente los estudios de resistencia o tolerancia a la radiación de los componentes electrónicos. La mejora del rendimiento de estos detectores pasa a menudo por estudios sobre nuevas mezclas de gases. En regiones del detector donde la tasa de partículas y de fondo son más elevadas, la sustitución de los detectores, utilizando nuevas tecnologías será inevitable. Los desarrollos permiten el enriquecimiento de experiencias por ambos experimentos y subsistemas, un buen ejemplo de ello es el desarrollo de novedosos MPGD de gran superficie, desarrollados en el marco común de la colaboración RD51.

En todos estos desarrollos las soluciones técnicas y los principales socios industriales se identifican temprano en el ciclo de desarrollo, ya que proporcionan la base para una evaluación técnica, costes, programación y análisis de riesgos. Desde una perspectiva nacional, es importante que los investigadores con experiencia en tecnología de detectores e industrias trabajen juntos —y con los socios internacionales— para establecer las capacidades competitivas en las fases de construcción. La fase más temprana de I+D es también una etapa muy productiva para la participación de los estudiantes y proporciona una base tecnológica muy sólida.

#### *Infraestructuras de vanguardia ¿garantía de futuro?*

El CERN ha desarrollado infraestructuras únicas en el mundo que le permiten estudiar y testear todos los componentes fundamentales de los aceleradores. Representan grandes inversiones, que el CERN mantiene y mejora continuamente, y son elementos imprescindibles de su estrategia de I+D. Entre las infraestructuras más destacadas del CERN se encuentran

los talleres de montaje y testado de los imanes pulsados (60 kV), imanes resistivos y superconductores (15 metros y 70 toneladas) y de cavidades aceleradoras; laboratorios de testado de cables superconductores (30 kA, 16 Tesla), de criogenia, compatibilidad electromagnética; fabricación de circuitos impresos incluido el testado y calibración con haces de alta energía e intensidad para los detectores; y dos experimentos con haces para el testado de la tolerancia y resistencia de componentes electrónicos a la radiación. Con una inversión de más de 50.000.000 de francos suizos en cinco años, estas infraestructuras serán las más avanzadas del mundo.

Un efecto colateral de estos desarrollos es la creación y mantenimiento de infraestructuras estables para I+D de detectores. El CERN facilita el acceso a instalaciones con haces de partículas, equipadas adecuadamente, y a fuentes de radiación ionizante bien caracterizadas para calificar los sistemas de detección y su electrónica asociada, a laboratorios especializados en tecnologías de interconexión a gran escala, salas limpias para ensamblaje de detectores, estandarización de sistemas de gas y refrigeración de detectores, prototipaje de estructuras realizadas en fibra de carbono ligera.

Disponer de estas infraestructuras proporciona al CERN una enorme ventaja competitiva y facilita su programa de I+D. Los progresos son apreciables sobre todo en el marco de la consolidación de las infraestructuras existentes y en particular cuando hay necesidad de realizar una labor de «retroingeniería». Estas infraestructuras permiten validar con seguridad el funcionamiento, comportamiento y fiabilidad de los sistemas antes de instalarlos en los aceleradores y detectores. ¡Sin duda alguna, uno de los activos más potentes del CERN de cara a su futuro!

## 5. Acelerando ciencia e innovación ¿complementariedad?

A lo largo de los últimos años y en particular durante los duros momentos de los ajustes de la crisis

financiera en España y en el mundo, mucho se ha escrito sobre la utilidad y el impacto de las grandes infraestructuras de investigación en la economía y en la sociedad. Relevantes personalidades del mundo del periodismo especializado, políticos, industriales y científicos han coincidido en resaltar la importancia de dar prioridad al desarrollo tecnológico como probable alternativa económica para Occidente y, más aún, para Europa, cuyo modelo social necesita una economía dinámica con un crecimiento superior al 2 por 100 y de fuerte valor añadido. No obstante, y tal vez sea una de las paradojas más intrigantes, la Ciencia sigue siendo en muchos países una variable privilegiada de ajuste del déficit presupuestario, infravalorando en algunos casos el impacto científico y económico de la discontinuidad de las políticas científicas. ¡Y favoreciendo nuevas inversiones penalizando la operación, consolidación y mejoras de las infraestructuras existentes!

Más que esa garantía de continuidad, los grandes instrumentos científicos representan una base sólida para el programa de física básica y son un entorno estable que permite el desarrollo de la comunidad científica. El CERN contribuye, a su manera, a ese esfuerzo global al establecer una visión científica, tecnológica y sobre todo humana para la Ciencia de hoy y mañana. Es impactante la cantidad de preguntas relacionadas con esta temática durante las entrevistas con directivos y científicos del CERN. ¿Cuestionamiento del coste financiero de los grandes instrumentos científicos? o inquietud por la posible desintegración de un modelo que, por su longevidad, ha permitido reutilizar infraestructuras para nuevos proyectos. ¿Cómo mantener un núcleo de científicos, ingenieros y técnicos procedentes de toda Europa y del mundo, ejemplo de un modelo exitoso de construcción de un mundo científico globalizado?

Al margen de estas consideraciones sociales, los estudios no solo han confirmado sino elogiado la cultura de la innovación en el CERN, y consideran que la organización tiene «vínculos evidentes a los avances

económicos, políticos, educativos y sociales del último medio siglo». La diversidad y nivel tecnológico de su personal y sus fuertes vínculos de colaboración con los institutos y universidades nacionales representan un «gran activo» para la organización, que puede ser desplegado en respuesta a necesidades estratégicas u operativas *top-bottom* o para respaldar oportunidades generadas dentro o al margen de la estrategia de I+D de la organización en un modo más conocido como *bottom-up*.

El beneficio de una alta estabilidad en la política científica y tecnológica se puede apreciar, en el caso del CERN, tomando como ejemplo el desarrollo de los imanes superconductores del LHC. Conseguir fabricar en serie los 1.232 dipolos superconductores —cada uno de 15 metros de largo y un peso de 35 toneladas— que permiten mantener las partículas dentro del anillo de 27 km, no fue una labor fácil. El diseño y la validación de estos dipolos se desarrollaron entre 1985-2001, cuando se emitió una llamada a licitación para la producción de esos imanes. En ese momento histórico, el LHC fue aprobado por el Consejo del CERN sin haberse demostrado la factibilidad de dicha producción en serie. ¡Imposible encontrar mejor ejemplo de confianza en los tecnólogos e industriales! ¡Y de confirmar que las apuestas de cara al futuro tecnológico son necesarias a pesar del riesgo intrínseco!

El desafío de los imanes empezó aun antes con la producción en serie de los cables superconductores hechos con una aleación de niobio-titanio (NbTi) y el diseño de un complejo sistema de criostato para mantener los imanes suficientemente fríos y funcionar en condiciones superconductoras, por debajo de -269 grados celsius.

¿Hay ejemplos similares desarrollados exclusivamente por la industria? Sí; en estos momentos cabe destacar el esfuerzo desarrollado por ejemplo por VIRGIN para realizar vuelos estratosféricos destinados al público. Pero aun en este caso, el aporte de los institutos científicos y universidades es altísimo. Diferentes estudios señalan que la innovación en la

vanguardia de la tecnología es «inherentemente difícil, costosa, lenta y arriesgada». Los riesgos se logran mitigar con un modelo como el aplicado en el CERN, manteniendo la responsabilidad directa, la toma de decisiones y el control de los proyectos. Si bien en muchos casos casi todo el «valor intelectual añadido» del proyecto surge del CERN, las empresas contratistas valoran positivamente la colaboración con el CERN ya que supone un modelo de intercambio tecnológico en un entorno multidisciplinario y multicultural que atrae a individuos ambiciosos y creativos. Son experiencias que se valoran internamente por su fuerza de tracción y a nivel internacional, al ser asociadas a éxitos mundialmente valorados.

### ¿Estimulando transferencia de tecnologías o de conocimientos?

En un modelo donde no prevalece la noción de contribución en especie, el concepto de retornos financieros ha de integrar igualmente las oportunidades de transferencia de tecnologías y de conocimiento. El CERN es muy activo en ambos aunque su modelo de integración industrial favorece más a las oportunidades de transferencia de conocimiento. La promoción de la innovación y el espíritu emprendedor es un factor crucial dentro de su misión de maximizar los retornos tecnológicos y de conocimiento a la sociedad.

La búsqueda incesante para comprender la naturaleza al nivel más fundamental requiere instrumentos científicos de un tamaño y una complejidad sin precedentes, llevando la tecnología al límite y estimulando la innovación industrial. Los Estados miembros del CERN tienen una posición privilegiada para compartir esa cultura de la innovación. A través de su participación en nuevos proyectos, desde la fase inicial de estudios y desarrollo de prototipos, las industrias de los Estados miembros se mantienen en la vanguardia de los nuevos desarrollos tecnológicos. De hecho, la industria desempeñó un papel de vital importancia en el desarrollo de los componentes del LHC, el buque

insignia del CERN, así como para sus experimentos. Las colaboraciones con la industria han contribuido al traspaso de saber y de tecnologías o bien, dicho de otra manera, a la formación de técnicos y de ingenieros. El CERN asesora activamente a sus colegas industriales para que adquieran y dominen tecnologías innovadoras, materiales y procesos muy delicados. Es más, las empresas están ahora preparadas para sacar el máximo provecho de su participación en los proyectos de I+D del CERN para futuros aceleradores, como por ejemplo la tecnología del innovador CLIC, las numerosas mejoras del LHC y la mejora de las instalaciones del experimento HIE-ISOLDE. Varios centenares de empresas colaboran cada año con el CERN en diseños de vanguardia, desarrollando tecnologías en el campo de la supraconductividad, de los imanes especiales, del vacío, de la radiofrecuencia, de la mecánica de precisión y de la instrumentación de haz. Aunque ese proceso les ha abierto las puertas a nuevos mercados, el CERN sigue siendo un cliente para los productos y servicios de esas empresas, continuando así el círculo virtuoso de la innovación, del desarrollo y de la preservación de las competencias adquiridas y de las inversiones. Esas innovaciones tienen aplicaciones directas en otros campos de la ciencia y su impacto en la sociedad es incuestionable.

Mantener un ambicioso programa de I+D en las áreas tecnológicas estratégicas ha sido siempre una prioridad de la organización y, conjuntamente con los laboratorios e industrias nacionales, ha favorecido innovaciones de interés común, propulsando las tecnologías y la transferencia de saber. En el ámbito de la alta competitividad mundial y del mercado libre, la contribución de las empresas de los Estados miembros les proporciona una ventaja de alto valor al asociarles con la imagen del CERN en el campo de la alta tecnología. De hecho, la mayor parte de las empresas que han trabajado para el CERN utilizan ejemplos en su material de marketing como pasaporte para nuevas oportunidades. Pero todas las tecnologías no disponen del mismo

potencial a medio y largo plazo. Las tecnologías de la información tienen una esperanza de vida limitada de dos o tres años comparados con más de diez años para innovaciones en áreas más tradicionales relacionadas con métodos de fabricación, de ensamblaje o de materiales. El modelo de amortización y la urgencia de llevar el producto al mercado son radicalmente diferentes.

### ¿Y la formación y educación?

El CERN proporciona un sistema de educación y de formación único para su personal, usuarios, colaboradores y estudiantes procedentes de los Estados miembros, ofreciendo un entorno tecnológico, multidisciplinario, puntero y multicultural. Una reciente encuesta indicó que el desafío de trabajar con compañeros de gran valía del mundo entero estimula el desarrollo personal de los individuos mucho más que otros entornos. Formando parte íntegra de su política de formación, el CERN ofrece *insitu* una extensa gama de formación especializada a todos los niveles en forma de escuelas de aceleradores, de computación y de física. Estos cursos están diseñados para introducir los últimos desarrollos científicos y tecnológicos a los jóvenes profesionales en sus especialidades. Para mantener su plantilla formada, los supervisores del CERN favorecen la cultura del doble empleo: un empleo dedicado a la operación, mantenimiento y mejora de sus aceleradores, detectores e infraestructuras y un segundo empleo más abierto a estudios relacionados con las prioridades en I+D de la organización. Implicar a cada trabajador en desafíos tecnológicos y novedades es una opción acertada del CERN ya que estimula la autoformación al más alto nivel. Otras iniciativas tienen efectos positivos cotidianos:

— Organizar y ejecutar gran parte de la formación interna y tutoriales es otro elemento que estimula favorablemente a ingenieros, físicos y técnicos que participen activamente en esas sesiones. ¡Compartir el saberhacer se convierte en una misión corporativa y en un instrumento de emulación individual!

— Seminarios de divulgación y de promoción de la ciencia que permiten una fertilización cruzada, valorando las actividades científicas y motivando a los jóvenes para que elijan carreras difíciles y no siempre financieramente interesantes, resaltando los beneficios sociales y culturales y subrayando los efectos positivos en las economías y para el crecimiento global de la nación. Pero a la vez permiten estimular al personal, tecnológica y culturalmente, incrementando su autoestima y manteniendo su avanzado nivel de preparación. ¡Fomentar el sentimiento de responsabilidad propia en autoformación profesional es una prioridad!

#### *El alto valor añadido de la diversidad*

Un importante beneficio que se pasa por alto muy a menudo es el impacto positivo del CERN en el sistema educativo. La colaboración de científicos con colegas del mundo entero eleva el rango en sus profesiones y posibilita mejorar la calidad de la educación de su país. Esto refuerza a las universidades, los institutos de investigación y la industria, ayudando al país a posicionarse como un país tecnológicamente puntero trabajando en los límites del conocimiento y de la innovación. La Organización tiene un programa de cursos de verano para estudiantes pregraduados, aprendices, estudiantes doctorales y postdoctorales. El CERN cubre los gastos de estos usuarios, iniciativa que ha ayudado a muchos científicos a proseguir sus colaboraciones con el CERN a pesar de las dificultades económicas de sus respectivos institutos.

#### *IdeaSquare ¿ejemplo de nuevos vectores de creatividad?*

IdeaSquare es una instalación piloto del CERN que acoge proyectos de I+D en detectores, facilita programas para estudiantes y puede albergar eventos especiales relacionados con la innovación. Esta infraestructura tiene como propósito reunir a un conjunto de expertos para generar nuevas ideas y

trabajar en prototipos conceptuales en un entorno abierto, contribuyendo a las actividades de transferencia de tecnologías. Es un experimento en sí, y explora nuevas formas de validar el valor de la investigación básica con la intención de ofrecer innovación a la sociedad con un coste marginal. Estas actividades se están cubriendo fuera del presupuesto anual del CERN. El objetivo del proyecto es reunir a investigadores, ingenieros, actores de la industria y jóvenes estudiantes para estimularles en la búsqueda de nuevas ideas beneficiosas para la sociedad e inspiradas en la I+D de los detectores del CERN. Este concepto es un concentrado del valor añadido que ofrece el ámbito del CERN y que se puede resumir en los siguientes puntos: permitir soñar y apostar por la curiosidad; compartir y abrirse a opciones diferentes; aprender a explicar sencilla y brevemente un trabajo y sus riesgos; y disminuir los plazos de gestión administrativa para producir cuanto antes un prototipo. ¡Siempre comprobar la factibilidad!

#### **Impactos en la sociedad: ejemplos destacados**

Hay numerosos ejemplos de traspaso de saber y de tecnología; estos tres ilustran los aspectos más relevantes de la contribución del CERN.

##### *Aplicaciones médicas*

El CERN ha sido pionero aplicando tecnologías de aceleradores y detectores en el campo de la medicina, en el área de la imagen médica y del tratamiento de células cancerosas con hadrones (protones e iones ligeros). Su primera contribución en el área de la imagen médica fue con un sistema PET en el Hospital de Ginebra en 1977, basado en las cámaras de avalancha de gas de alta densidad (HIDAC). Siempre ha sido un área de fuerte desarrollo, con la tecnología Crystal Clear, que se inició en 1990 basada en tecnologías desarrolladas para los detectores del LHC, hasta la versión actual del TurboPET (2015) que amplifica

la luminosidad utilizando cristales fotónicos. El objetivo, alcanzar resoluciones espaciales de 3 mm y reconstrucción 3D de las imágenes. También conviene mencionar la tecnología del Medipix cuya primera aplicación médica fue en 1997. En 2015, y con el objetivo de posibles aplicaciones en el detector LHCb, la combinación de la versión 3 del Medipix y del Timepix3 ha permitido desarrollar un detector de alta resolución espacial y temporal, abriendo camino al seguimiento en tiempo real de la deposición de la dosis. ¡Probablemente otra revolución en perspectiva!

Durante estos últimos años el potencial del tratamiento del cáncer con haces de protones e iones ligeros ha potenciado las simulaciones de deposición de energía en diferentes tejidos cancerosos. Los programas de simulación FLUKA y GEANT4 del CERN podrían revolucionar el tratamiento de los pacientes y reducir los efectos colaterales al permitir un mejor ajuste de la dosis en función del tipo de tumor, pero también en función de su posición en el cuerpo y de la presencia o no de una estructura ósea y de los inevitables movimientos biológicos de los órganos internos.

La imagen médica y los tratamientos generan, como lo hacen los detectores del LHC, gigantescas cantidades de datos y con similares problemas de conservación de datos a largo plazo. El CERN empezó a trabajar en esta área en 2002 con tres proyectos (EGEE, EGI, y EMI) y ha incrementado su participación a raíz de su proyecto CERN Openlab Medical Applications, con un taller en 2014 dedicado a la simulación del funcionamiento de la conexión de las neuronas, análisis de los datos del genoma, el libre acceso a los datos médicos, el tratamiento de imágenes médicas y la disseminación de las técnicas del Big Data para aplicaciones médicas.

El tratamiento de células cancerosas con radionúclidos es cada vez más importante en el mundo de la oncología, y conviene resaltar el papel del experimento ISOLDE del CERN el cual permite fabricar todo tipo de radionúclidos. La nueva infraestructura MEDICIS

permitirá acelerar los estudios en este ámbito. Y como complemento, el desarrollo de un pequeño acelerador de tipo miniciclotrón (AMIT) por el CIEMAT con ayuda del CERN en aspectos de criogenia para fabricar, *in situ* en los hospitales, radionúclidos de poca duración pero que proporcionan más centelleo para el diagnóstico de los tumores. ¡Unas oportunidades únicas en Europa!

Y finalmente, el diseño de aceleradores para el tratamiento de los tumores con haces de partículas. Los primeros conceptos de un ciclotrón y un sincrotrón se remontan a 1989. Pocos años después en 1991 y en colaboración con la Fundación TERA, el CERN empezó sus trabajos sobre un sincrotrón para acelerar iones ligeros de carbono. El diseño del PIMMS fue completado en 1995 y fue concretado por el CNAO, entre 2005-2010, y el centro MedAustron (Wiener Neustadt, Austria) entre 2006-2012. Ambos centros están en funcionamiento actualmente con haces de partículas. Convertir partículas en tratamiento médico no ha sido tarea fácil.

#### *Computación, grid, cloud y software*

Los experimentos del CERN y del LHC en particular, generan una impresionante cantidad de datos científicos que necesitan ser elaborados, filtrados, transferidos y almacenados. Para fines propios, el CERN, conjuntamente con socios de institutos, universidades e industria, ha desarrollado amplios programas de I+D y mejoras para tratar los grandes volúmenes de datos, compartir infraestructuras de *Grid*, desarrollar *software* específico y favorecer innovaciones tecnológicas.

Los detectores y sistemas de tratamiento y computación asociados están diseñados principalmente para entregar la información y compartirla entre los físicos de todo el mundo. Tal necesidad originó la idea de Tim Berners Lee de inventar la *World Wide Web* (WWW) siendo becario en el CERN. La aceleración de la economía generada por el WWW y el incremento exponencial de la cantidad de datos puso en marcha el Worldwide LHC Computing Grid, la integración de miles de ordenadores y sistemas de almacenamiento

para gestionar los más de 15 petabytes de datos generados cada año por los experimentos del LHC.

El CERN lidera igualmente el proyecto EGI-INSPIRE, una iniciativa para crear y mantener una infraestructura paneuropea para el tráfico electrónico entre redes de centros de computación de alto rendimiento y los recursos de alto flujo de datos. Esto ayudará a integrar las nuevas «nubes» (*cloud*) y las infraestructuras de computación distribuida generadas por la explosión de la información. Otra asociación es Helix Nebula, una asociación de *nubes* que se ocupará de los problemas de gestión de la información de tres grandes organismos que generan gran cantidad de datos: el proyecto de riesgo geológico de la ESA, el portal para el análisis del genoma del EMBL y Helix Nebula, el experimento ATLAS del CERN que gestiona la información de los 600 millones de colisiones por segundo. El *Grid* y las iniciativas de la *nube*, como la propia web, se pusieron en marcha para cubrir las necesidades de la Ciencia Básica, pero rápidamente se han aplicado a la vida cotidiana.

Por lo general, el *software* producido por el CERN es altamente especializado y destinado, por ejemplo, para supervisar o controlar un detector de partículas o un subsistema específico de un acelerador de partículas: vacío, criogenia, cavidades de radiofrecuencia, etc. La transformación de *software* interno en un producto genérico requiere un considerable esfuerzo por parte de la organización: tiene que ser fiable, proporcionar *interfaces* gráficas de usuario atractivas e intuitivas, y ofrecer documentación y servicios de apoyo. Sin embargo, estos ejemplos ilustran a la perfección cómo un centro de investigación puede generar impactos positivos al proporcionar productos útiles con código abierto, y sin desviarse del principal objetivo científico de la organización.

### *Tecnologías de alto vacío*

El liderazgo del CERN en este ámbito es reconocido mundialmente por sus capacidades de diseño, de

modelización numérica, sus posibilidades de fabricar prototipos y realización de capas finas, y finalmente por sus posibilidades de testear en sus laboratorios e incluso en ciertos tramos de los aceleradores especialmente equipados para estos estudios. ¡Con tal infraestructura, el liderazgo sigue garantizado y la industria asociada está preparada para seguir colaborando en esa I+D!

La necesidad de circular las partículas por una cámara de haz con un vacío muy alto para incrementar la esperanza de supervivencia —disminuyendo la probabilidad de colisiones con los átomos del vacío residual— es por diseño una prioridad por parte de la comunidad de aceleradores y del CERN en particular. Desde los años sesenta, el CERN en colaboración con la industria ha desarrollado y mejorado tecnologías de bombeo, instrumentación asociada y capas finas con estructuras y elevado rendimiento para el vacío muy alto. Esta última tecnología se ha desarrollado e industrializado totalmente en el CERN, y ha sido pasada a la industria con los correspondientes contratos de transferencia de tecnología.

El ejemplo más reciente de semejante contrato se hizo en el marco del diseño y fabricación de las cámaras de vacío para el nuevo sincrotrón de cuarta generación que se está finalizando en Lund, Suecia (2011-2015). El CERN, en colaboración con el instituto MAX IV y la industria alemana, ha diseñado las cámaras de vacío y optimizado el proceso de deposición, elevando a su vez las capacidades de producción del socio industrial. Otro relevante ejemplo del elevado compromiso del CERN en cuanto a traspaso de tecnología y saber.

La tecnología de capas finas de bombeo con aleación de titanio-zirconio-vanadio (TiZrV) desarrollada por el CERN tiene también aplicaciones fuera del ámbito de los aceleradores, por ejemplo en el diseño de un modelo particular de paneles solares. Las capas finas de esta aleación y su estructura microscópica proporcionan bombeo y un comportamiento óptico muy interesante. ¡Ayuda a transformar la luz en energía!

## 6. Comentarios finales

El CERN es un caso peculiar dentro de los grandes instrumentos científicos, posiblemente la última de estas grandes infraestructuras científicas con aportación exclusivamente en efectivo por parte de sus miembros, Estados, institutos, universidades o socios industriales. Probablemente no sea el criterio exclusivo del éxito del CERN de estos últimos 61 años pero, a la vista de la flexibilidad y las posibilidades de gestión generadas, ha sido y sigue siendo con certeza un elemento determinante.

Aunque conviene resaltar la absoluta necesidad de seguir generando innovación a través de un programa de I+D muy potente y de adaptarse continuamente a la evolución de la sociedad y de la industria que influyen en el modelo de financiación pública y privada. ¡Ser el mejor no es suficiente, hay que saber convencer a los actores que influyen en las decisiones estratégicas!

La aprobación por parte del Consejo del CERN del proyecto de alta luminosidad del LHC, de sus presupuestos de I+D y de los estudios emprendidos para preparar opciones para la próxima generación de aceleradores post-LHC, son factores muy positivos que, sin duda alguna, garantizan el futuro de la Organización y refuerzan su papel en un marco de relaciones con los institutos y universidades de los Estados miembros y de su industria. A la vez que mantiene su liderazgo mundial.

Y finalmente, terminar recordando la valoración de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), cuya misión es promover políticas

que mejoren el bienestar económico y social de las personas en todo el mundo: valoramos al alza el impacto del CERN a medida que intensifica su proyección internacional en la física de alta energía y disciplinas relacionadas. Su impacto económico y social solo puede aumentar<sup>7</sup>.

## Referencias bibliográficas

- [1] CENTRO NACIONAL DE FÍSICA DE PARTÍCULAS, ASTROPARTÍCULAS Y NUCLEAR (CPAN) (2014). Información institucional, marzo. Disponible en: <https://www.icpan.es/noticias.php>
- [2] GIANOTTI, F. (2016). *Information on the Medium-Term Plan for the Period 2017-2021*. CERN SPC.
- [3] GILLIES, J.; JAKOBSSON, C.; MARSOLLIER, A.; MEXNER, V. y O'CONNOR, T. (2013). «Accelerating Science and Innovation; Societal Benefits of European Research in Particle Physics». *European Particle Physics Communication Network for the CERN*. Recommendations of the European Strategy Committee. Mayo. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/1551933?ln=en>
- [4] ORGANIZACIÓN EUROPEA PARA LA INVESTIGACIÓN NUCLEAR (CERN) (2014). Programa experimental del CERN. Disponible en: <https://greybook.cern.ch/greybook/index.gsp>
- [5] ORGANIZACIÓN EUROPEA PARA LA INVESTIGACIÓN NUCLEAR (2016a). Información institucional sobre el CERN, disponible en: [www.cern.ch](http://www.cern.ch)
- [6] ORGANIZACIÓN EUROPEA PARA LA INVESTIGACIÓN NUCLEAR (2016b). Red de aceleradores, disponible en: <http://home.cern/about/accelerators>
- [7] ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO (2014). *The Impacts of Large Research Infrastructures on Economic Innovation and on Society: Case Studies at CERN*. © OECD. Disponible en: <http://www.oecd.org/sti/sci-tech/CERN-case-studies.pdf>

---

<sup>7</sup> Ver Informe de la OCDE sobre el CERN.

## ANEXO

### Siglas utilizadas

AMIT	Advanced Molecular Imaging Technologies
ATLAS	A Toroidal LHC Apparatus, CERN High-luminosity LHC Detector
AWAKE	Plasma Wakefield Acceleration at CERN
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CLIC	Compact Linear Collider
CMS	Compact Muon Solenoid, CERN High-luminosity LHC Detector
CNAO	Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (Pavía, Italia)
CPAN	Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear
EGEE	Enabling Grids for E-science
EGI	European Grid Infrastructure
EMBL	Europeana Laboratory of Molecular Biology
EMI	European Middleware Initiative
ESA	European Space Agency
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures
EuCard	Enhanced European Coordination for Accelerator
EuroCirCol	European Circular Energy-Frontier Collider Study
FCC	Future Circular Collider
FLUKA	Fully Integrated Particle Physics Monte Carlo Simulation Package
GEANT4	GEometry ANd Tracking, toolkit for the simulation of the passage of particles through matter.
HE-LHC	High Energy LHC
Helix Nebula	European Cloud-based Scientific Infrastructure
HIDAC	High Density Avalanche Chamber
HIE-ISOLDE	High Intensity and Energy ISOLDE
HL-LHC	High Luminosity LHC
IdeaSquare	<a href="http://knowledgetransfer.web.cern.ch/ideasquare">http://knowledgetransfer.web.cern.ch/ideasquare</a>
ILL	Institut Laue-Langevin
ISOLDE	Radioactive Ion Beam Facility at CERN
ITER	Centro de fusión (significa el «camino» en latín)
LHC	Large Hadron Collider
LHCb	Large Hadron Collider Beauty Experiment, CERN Low-luminosity LHC Detector
LHeC	Large Hadron Electron Collider
LTS	Low Temperature Superconductors
MAPS CMOS	CMOS Monolithic Active Pixel Sensors
MAX IV	Synchrotron Radiation Facility, Lund - Sweden
MEDICIS	MEDical Isotopes Collected from ISOLDE
MPGD	Micro-pattern Gas Detectors
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
PET	Positron Emission Tomography
PIMMS	Proton Ion Medical Machine Study
RD51	Development of Micro-Pattern Gas Detectors Technologies
RPC	Resistive Planar Cameras
TeV	Terra Electron Volt
TIARA	Test Infrastructure and Accelerator Research Area

## ***Ángela Ruíz Robles y la invención del Libro Mecánico***



Número de páginas: 90  
Soporte Pdf: 4,00 €  
Precios incluido IVA

La monografía de “Ángela Ruíz Robles y la invención del libro mecánico” incluye una serie de estudios y reflexiones sobre una maestra especial y poco conocida, que se anticipó con su invención y proyectos a las prestaciones y diseño de los soportes de lectura actuales. Su objetivo era facilitar el aprendizaje y educar de una manera menos tradicional y más interactiva en los difíciles años posteriores a la Guerra Civil española, siendo capaz de idear y llevar a la práctica un prototipo de «libro mecánico» estrechamente emparentado con los actuales soportes electrónicos de lectura, y que pretende situar los trabajos doña Angelita, en el lugar que merecen los innovadores, siendo observado desde diferentes puntos de vista: pedagógico, sociológico, tecnológico y personal de la autora. También se incluyen las patentes que, en 1949 y 1962 Ángela Ruíz Robles presentó de su “procedimiento mecánico, eléctrico y a presión de aire para la lectura de libros” así como de su enciclopedia mecánica.