

El Tuning Quadrupole. Primer prototipo español de imán superconductor suministrado al CERN

LUIS GARCIA-TABARES (*)
JOSE MANUEL CUBERT (**)
PATXI AGUIRRE(**)

RESUMEN. Este artículo describe el diseño y fabricación del primer imán superconductor para el futuro acelerador LHC del CERN (Ginebra) que la industria española ha fabricado con la colaboración del CEDEX.

Se comentan los aspectos generales de los cálculos mecánicos y magnéticos así como los problemas relacionados con la fabricación del imán, como materiales, utillaje, medidas, etc. Por último se analizan los diferentes ensayos realizados al imán durante su fabricación, destacando el éxito final del proyecto.

THE TUNING QUADRUPOLE. THE FIRST SPANISH PROTOTYPE OF SUPERCONDUCTING MAGNET TO BE DELIVERED TO CERN

ABSTRACT. *The present paper describes the design and manufacturing of the first prototype of superconducting magnet for the future collider LHC to be installed at CERN (Geneva), that was made by Spanish industry with the collaboration of the CEDEX.*

The main aspects of the magnetic and mechanical calculations are described, as well some items related to the fabrication of the magnet, such as materials, toolings, measurements, etc. Finally all the tests made to the magnet at different stages are mentioned, concluding with the final success of the development.

1. INTRODUCCION

En junio de 1989 el CERN firmaba un acuerdo de colaboración con el grupo de empresas español ACICA para la construcción de un prototipo de imán superconductor tipo «Tuning Quadrupole» con destino al CERN (Ginebra). Este imán constituía la aportación española en el terreno de la superconductividad aplicada al proyecto del futuro acelerador superconductor LHC (Large Hadron Collider), para el que otras destacadas industrias europeas han fabricado toda clase de prototipos de imanes superconductores.

Con anterioridad a este acuerdo, la empresa constructora del Tuning Quadrupole, INDAR, S. A., del grupo ACICA, había firmado con el CEDEX un convenio de asistencia técnica para que el autor de este artículo par-

ticipase en el diseño y proyecto del citado imán, siendo su responsable técnico por la parte española.

Exactamente cuatro años después, el imán era entregado al CERN y en septiembre de 1992 se ensayaba con éxito en sus instalaciones.

2. LOS IMANES DEL LHC

Dentro de las instalaciones que el CERN (Laboratorio Europeo de Partículas) tiene en Ginebra, está prevista la construcción de un nuevo acelerador de 16 TeV de energía total con una luminosidad de $1,6E34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-2}$, el LHC, un colisionador de hadrones que aprovecharía la obra civil del actual acelerador en servicio, el LEP, que con su túnel de 27 km de perímetro constituye, desde hace cuatro años, el mayor acelerador de partículas del mundo.

En este tipo de aceleradores, la tarea de guiado y focalización de las partículas es realizada por imanes de diferentes tipos (dipolos, cuadrupolos, etc.). Hasta la presente generación de aceleradores, los imanes utilizados eran clásicos, es decir, estaban contruidos con un

(*) Sector de Técnicas Físicas del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente).

(**) ACICA-INDAR.



FIGURA 1. Media celda de imanes en el LHC.

conductor convencional refrigerado, generalmente, por agua.

Cuando la energía del acelerador sube por encima de un determinado umbral, los campos magnéticos necesarios en los imanes alcanzan valores demasiado altos para la tecnología clásica y deben ser resueltos a base de superconductores.

El LHC no será el primer acelerador superconductor del mundo pero sí el que alcance campos magnéticos más elevados (hasta 9 tesla en los dipolos principales).

Dentro del LHC los imanes se disponen en una determinada configuración; el anillo se divide en ocho octantes, cada uno de los cuales está formado por 49 medias celdas cuya disposición de imanes, según el proyecto original, aparece en la figura 1, en la que D corresponde a dipolos, Q al cuadrupolo principal, TQ al Tuning Quadrupole, S al sextupolo y DC al dipolo corrector.

La forma más general de clasificar los imanes de un acelerador es atendiendo a su número de polos que, a su vez, determina la geometría del campo magnético en el interior del imán y, por tanto, su efecto sobre la trayectoria de las partículas. Así por ejemplo, un dipolo crea un campo constante en amplitud y dirección que impone la curvatura de la trayectoria del haz; un cuadrupolo impone un campo de gradiente constante encargado de focalizar el haz de partículas y en general, el resto de multipolos se encargan de corregir los errores de trayectoria que inducen las imprecisiones de campo existentes en los dipolos y cuadrupolos.

Cada imán tiene, por tanto, una forma de cuantificar su acción sobre las partículas. En el caso de los cuadrupolos, se habla del gradiente máximo de campo y de la longitud magnética integrada, es decir, aquella longitud efectiva a lo largo de la cual el imán actúa sobre el haz.

Por otra parte y como ya se ha mencionado, todos los imanes del LHC son superconductores, lo que les confiere unas características muy especiales desde el punto de vista de prestaciones y diseño.

Como es sabido, la superconductividad es la propiedad que tienen algunos materiales de perder completamente su resistencia eléctrica por debajo de una cierta temperatura crítica. Sin embargo, la capacidad de transporte de corriente de un material en estado superconductor depende no sólo de su temperatura sino del

campo magnético en el que está inmerso, de manera que para un cable superconductor dado que trabaja en un baño de helio a temperatura constante, la máxima corriente que puede transportar disminuye rápidamente con el campo haciéndose nula a 10 T, aproximadamente, en el caso del niobio titanio.

Estas circunstancias son determinantes a la hora de diseñar cualquier imán superconductor como se verá en apartados posteriores.

3. EL TUNING QUADRUPOLE. ASPECTOS GENERALES

Dentro del conjunto de imanes del acelerador, se encuentra el Tuning Quadrupole o cuadrupolo de sintonía, un imán superconductor que trabaja, como el resto de imanes del acelerador, a 1,8 K de temperatura y que está construido con hilo superconductor de niobio titanio.

Su misión es la de ajustar el punto de trabajo del LHC a partir de una alimentación independiente que varía entre ± 1600 A. La tabla 1 resume las características más importantes de este imán.

Básicamente, la estructura del imán está formada por tres partes concéntricas. Del interior al exterior estas partes son: el devanado superconductor, el anillo de precompresión de aluminio y el yugo magnético. Hay además algún componente adicional como el zuncho de

GRADIENTE MÁXIMO	± 120 T/m
CORRIENTE	± 1.600 A
LONGITUD MAGNÉTICA	0,72 m
CAMPO MÁXIMO EN LA BOBINA	3,9 T
DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL SUPERCONDUCTOR	1.520 A/mm ²
DIÁMETRO INTERIOR DEL IMÁN	56,3 mm
DIÁMETRO EXTERNO TOTAL DEL IMÁN	170 mm
ENERGÍA ALMACENADA	12,8 kJ

TABLA 1.

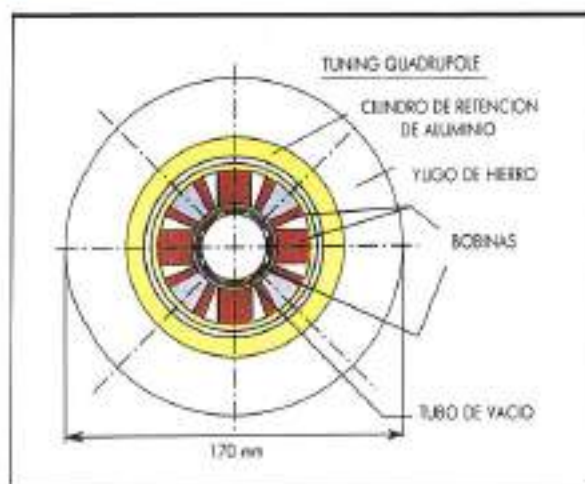


FIGURA 2. Sección del Tuning Quadrupole.

fibra de vidrio o la pantalla antifricción, que constituyen elementos de interfase mecánica entre el devanado y el cilindro de precompresión de aluminio.

La figura 2 representa una sección del cuadrupolo con sus elementos básicos.

Desde el punto de vista de diseño, existen dos aspectos generales a los que hay que dedicar la máxima atención: el cálculo electromagnético y el mecánico o estructural. Hay también otras consideraciones importantes de entre las que destaca el cálculo del «quencho», es decir, las consecuencias térmicas y eléctricas que una pérdida súbita del estado superconductor tendría sobre el imán.

4. EL CÁLCULO ELECTROMAGNETICO

El objetivo básico de este cálculo es el de optimizar la calidad del campo en el interior de la apertura del imán, tratando, por otra parte, de minimizar la cantidad de material superconductor y de cumplir los requisitos de corriente de alimentación que, generalmente, tienden a reducir al mínimo posible este parámetro.

Para hacer el cálculo se hace uso de programas de ordenador que estiman el valor del campo, no sólo en la zona de interacción con el haz, sino dentro de la bobina, para poder conocer en todo momento la corriente de transporte disponible en el superconductor.

El método utilizado para este cálculo se basa en la expresión del potencial vector para un conductor filamento y infinitamente largo que, así considerado, sólo tiene componente en la misma dirección del conductor. De acuerdo con la nomenclatura de la figura 3, las expresiones del potencial vector en las diferentes regiones viene dada por:

$$A_z(r, \theta) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{c}\right)^n \cos n(\varphi - \theta) \quad \text{Para } r < c$$

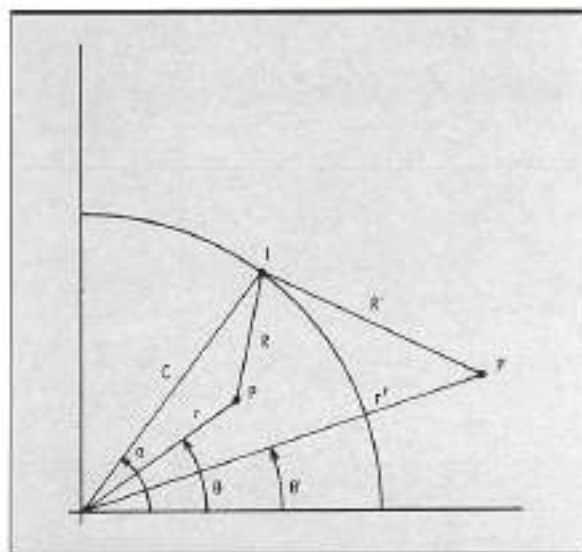


FIGURA 3. Cálculo del potencial vector de una corriente I.

$$A_z(r, \theta) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[-Ln r' + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{c}{r}\right)^n \cos n(\varphi - \theta') \right] \quad \text{Para } r > c$$

A partir de las expresiones del potencial vector, se calcula la densidad de flujo por la conocida relación:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$$

Como puede verse, las expresiones anteriores aparecen como la suma de infinitas componentes armónicas espaciales, permitiendo evaluar la existencia de todos los multipolos.

La ventaja que tiene el método es que se pueda calcular el potencial vector de un conductor real con una sección cualquiera, sin más que dividirlo en pequeños conductores que se consideran filamentos y a los que se aplican las expresiones anteriores sumándolas algebraicamente.

La aportación del yugo de hierro al campo magnético puede evaluarse de forma sencilla dada su geometría circular. En efecto, el hierro constituye un espejo magnético en el que se reflejan los conductores, apareciendo nuevos conductores virtuales cuya contribución al potencial vector total y al campo puede calcularse con las expresiones anteriores.

En el planteamiento anterior se ha considerado que el problema es bidimensional, por lo que la contribución de las cabezas de bobina se ha ignorado. En el estudio magnético de este imán sí se ha considerado su contribución al campo total, aunque este análisis se ha realizado aceptando ciertas simplificaciones sobre su geometría, que de no haberse hecho, hubieran dificultado tremendamente un análisis cuya principal utilidad es el cálculo de errores integrados en longitud, para los que

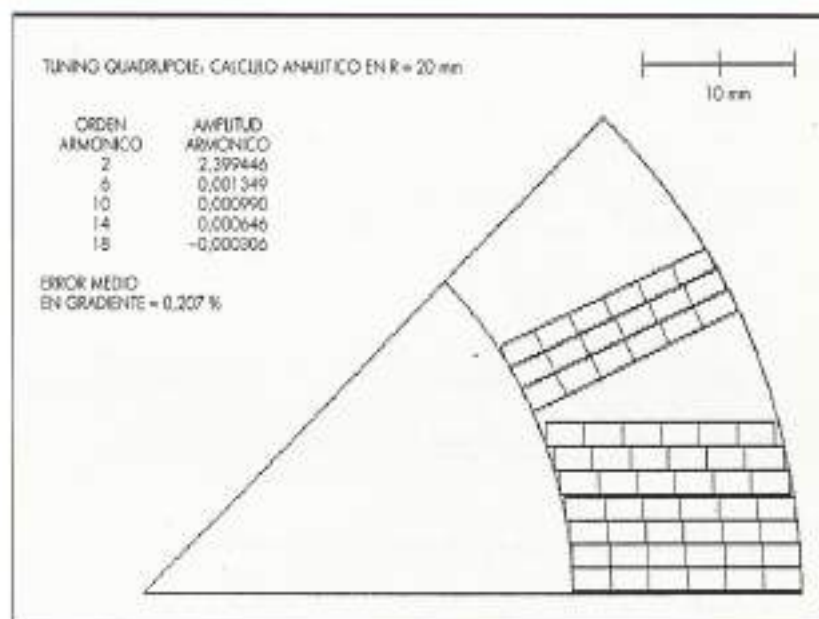


FIGURA 4. Disposición de conductores y cálculo de armónicos.

no es necesario un conocimiento muy detallado del campo en la extremidad.

El objetivo final del análisis magnético es doble: de una parte conocer y minimizar la cantidad de armónicos distintos del principal, en nuestro caso $n = 2$, y de otra evaluar el campo en el interior de superconductor. La figura 4 representa la distribución final de conductores en un octante de imán y la amplitud de los principales multipolos, según los resultados de un programa realizado por el autor.

Hay que resaltar que en un imán de este tipo y aplicación, las especificaciones de campo son muy rigurosas, de forma que ligeros errores de cálculo o de posicionamiento de los conductores durante la fabricación del imán, conducen a resultados inadmisibles. Por ejemplo, la tolerancia admitida en el posicionamiento del centro

de gravedad de cada bloque de conductores en el Tuning Quadrupole es de 20 milésimas de milímetro.

Con respecto al estudio del campo en el superconductor, su finalidad consiste en conocer el punto de trabajo del cable. Si, por una parte, se representa su característica de corriente crítica, es decir, la máxima corriente de transporte en función del campo y por otra la recta de carga del imán, es decir, el campo máximo que se induce en el superconductor en función de la corriente que lo recorre, la intersección de ambas curvas dará el punto de campo y corriente máximos a los que puede operar el imán. Superado ese punto el imán deja de ser superconductor. Generalmente, en cualquier diseño de un imán superconductor se trabaja con un margen de seguridad amplio tratando de evitar el «quench». La figura 5 representa el proceso anterior en el caso del Tuning Quadrupole.

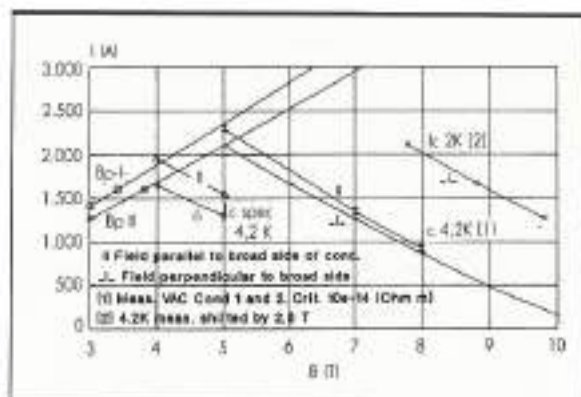


FIGURA 5. Recta de carga vs. corriente crítica.

5. ESTUDIO MECÁNICO

Curiosamente, tan importante o más que el estudio magnético en un imán superconductor, resulta su cálculo estructural, porque el más mínimo movimiento de un cable en operación, puede conducir al imán al «quench». Por otra parte, la práctica totalidad de los devanados en dispositivos superconductores de potencia están impregnados con resinas para mantener los conductores unidos, creando una estructura que trabaja muy bien a compresión, pero que apenas aguanta esfuerzos de tracción.

El objetivo, por tanto, del diseño mecánico es el de conseguir que todos los conductores trabajen a tracción cuando el imán esté en operación. Si las fuerzas electromagnéticas que se desarrollan generan compresión en



FIGURA 6. Cálculo analítico de esfuerzos y deformaciones tangenciales.

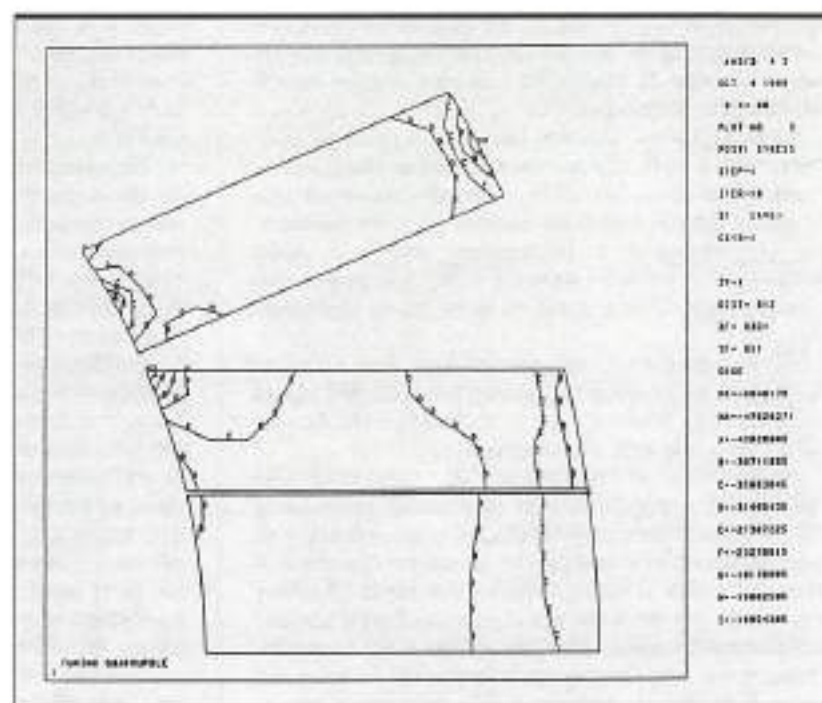
los devanados el problema es sencillo, pero si generan tracción, como es el caso habitual, hay que diseñar algún elemento estructural que comprima los conductores para que cuando estén activos, no trabajen a tracción.

En el caso de este imán, las fuerzas electromagnéticas que aparecen inducen esfuerzos de tracción en la cara interior de los conductores, debiendo ser contrarrestados por una precompresión inicial, que la suministra un cilindro de retención de aluminio (véase figura 2) calado en caliente.

La determinación de los esfuerzos inducidos en los

conductores a partir de las fuerzas de Lorentz se resolvió por dos procedimientos diferentes. De una parte uno más sencillo, que consideraba todo el devanado como una viga curva con unas condiciones en los extremos y unas cargas aplicadas en los centros de gravedad de cada bloque, correspondientes a las fuerzas de Lorentz. El problema así planteado es hiperestático y debe resolverse a partir de ciertas condiciones sobre los desplazamientos de los extremos.

El otro método de resolución consistió en utilizar un programa de elementos finitos (ANSYS) para, en pri-



mer lugar, determinar las fuerzas electromagnéticas y en segundo, la distribución de esfuerzos y deformaciones.

La figura 6 representa la distribución de esfuerzos tangenciales en el imán, mientras que la figura 7 corresponde a un cálculo por elementos finitos.

Una vez que se conocen los esfuerzos de tracción inducidos en el devanado, es necesario calcular la interferencia del cilindro de retención para conseguir que, después de calado, comprima la bobina al nivel deseado.

Aunque, en principio, el cálculo de un cilindro de retención por calado es sencillo y conocido, al tratarse de una práctica industrial habitual, en este caso aparecen complicaciones derivadas de la indeterminación de los módulos de elasticidad de los diferentes materiales que integran el imán a temperatura criogénica y del desconocimiento de las contracciones térmicas desde temperatura ambiente a 1,8 K para ciertas partes del cuadrupolo, fundamentalmente de su devanado.

Todos estos datos han tenido que ser obtenidos, bien de experiencias previas del CERN con otros imanes, bien de medidas «ad hoc» durante la fabricación de éste o, incluso, de algunos pequeños ensayos realizados en el CEDEX.

De gran importancia han sido también ciertas medidas de esfuerzos con bandas extensiométricas y con extensómetros y alexómetros suministrados por el CEDEX durante el montaje del imán y sus pruebas finales para conocer su estado de sollicitaciones mecánicas en las diferentes etapas de su construcción o su comportamiento final.

6. OTROS CALCULOS

Como se decía al principio del artículo, el hecho de que el imán sea superconductor le añade aspectos nuevos durante la fase de diseño. El más significativo es, sin duda, el cálculo del «quench».

Existen diversos factores que pueden llevar al imán a perder su estado superconductor; una pérdida del helio refrigerante, un fallo en el control del haz de partículas que se estrella contra las paredes del imán calentándolo por encima de la temperatura crítica, el súbito movimiento de un cable superconductor o la generación y propagación de una grieta en la resina de impregnación, etc.

En cualquier caso, aunque ocurriera una de estas circunstancias o cualquier otra que conduzca al imán al «quench», éste tiene que estar calculado para que no sufra daños tras esta eventualidad.

Básicamente el mecanismo de generación del «quench» es el siguiente: tras una perturbación local, una parte del superconductor pasa al estado normal y se calienta. A partir de aquí pueden pasar dos cosas; que el cobre que rodea al superconductor sea capaz de tomar la corriente que circulaba por el superconductor aliviándole momentáneamente para que vuelva a ser superconductor, o que este proceso estabilizador del cobre no sea capaz de anular el «quench» y éste comience a propa-

garse a lo largo de devanado hasta alcanzar a todo el imán.

Si esto sucede hay una transformación de la energía almacenada en el campo magnético del imán en energía calorífica que calienta los devanados, que ya no son superconductores, por efecto Joule.

Todos estos procesos tienen como consecuencia básica un aumento de la temperatura del imán y una sobretemperatura entre los límites de la zona no superconductora. La primera circunstancia puede llegar a fundir localmente el cable mientras que la segunda puede perforar su aislamiento.

Los cálculos del «quench» fueron realizados en el CERN con ayuda de programas de cálculo específicos. Dada la relativamente baja energía almacenada en este imán, los valores finales de temperatura y tensión inducida son pequeños y no hacen peligrar en absoluto la integridad del cable.

7. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL IMAN

Una vez realizados los cálculos anteriores, se procedió al diseño del imán traducido en la generación de los planos generales para la realización de los de detalle y construcción del imán. Un paso simultáneo al proyecto y construcción del imán, fue el proyecto y construcción de todo el utillaje y maquinaria necesarios en base a la experiencia del CERN en la fabricación y seguimiento de otros imanes y en la de INDAR en el campo similar de las máquinas eléctricas. Así pues, hubo que proyectar y fabricar la máquina de devanar el imán con sus elementos accesorios, freno y tensiómetro, el horno de impregnación y curado de la resina así como innumerable utillaje intermedio para fabricar las bobinas, montañas, zancharias, hacer el calado del cilindro de retención, etc. Un elemento que ha introducido una complicación adicional es el de la precisión requerida para conseguir la calidad de campo especificada por el CERN.

Esta precisión ha obligado a trabajar con tolerancias de posicionamiento extremadamente pequeñas en un campo donde no es habitual en absoluto. A su vez, estos requisitos han obligado a una construcción muy minuciosa tanto del imán como de su utillaje de fabricación, parte del cual ha sido subcontratado a empresas nacionales de mecánica de precisión.

Problema también importante fue la elección y localización de los materiales a utilizar, muchos de los cuales no son de uso frecuente o, aun siéndolos, se les exigen propiedades que no son conocidas. Es el caso del acero inoxidable que forma los postes sobre los que se devanan las bobinas y al que se le exige una permeabilidad magnética a 1,8 K muy cercana a la unidad. Fue necesario caracterizar diferentes muestras de inoxidable en el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón para elegir el más adecuado, aun cuando todos tenían la misma denominación comercial.

También otros materiales como resinas, pegamentos, aislantes, etc., han debido ser ensayados en los la-



FIGURA 8. Fase final en la fabricación del imán. (Foto INDAR).

laboratorios del CERN, incluso a la resistencia a la radiación, para su homologación como componentes del Tuning Quadrupole.

La mayoría de elementos del imán han sido suministrado del fabricante, aunque algunos, como el cable superconductor y su aislamiento, fue suministro de una empresa alemana a través del CERN.

El proceso global de fabricación del imán y su utillaje ha sido largo y difícil, durando algo más de tres años. Muchas han sido las pruebas parciales o los preprototipos que ha habido que fabricar hasta poner a punto determinados procesos y varias también las modificaciones introducidas durante el proyecto como consecuencia de los resultados de las pruebas anteriores. Incluso el propio cable superconductor hubo de ser aislado por segunda vez tras detectarse problemas en la primera versión.

La figura 8 corresponde a una fotografía del imán en la fase final de su fabricación.

8. ENSAYOS Y CONCLUSIONES

Si bien el imán en su conjunto fue probado en las instalaciones del CERN en septiembre de 1998, han sido necesarias muchas pruebas preliminares hasta confirmar cálculo, diseño y proceso de fabricación, como se decía en el punto anterior.

Se comenzó haciendo un imán corto, de 150 mm de longitud, con bobinas simuladas que sirvió para aceptar los modelos de cálculo mecánico al tiempo que se desestimaba la primera solución para la pantalla antifricción.

Se hicieron bobinas de prueba que sirvieron para poner a punto los difíciles procesos de bobinado y de impregnación, se hicieron innumerables pruebas de zunchado usando instrumentación del CEDEX que finalmente sirvieron para que INDAR desarrollase una técnica extraordinariamente eficaz, se midieron propiedades mecánicas, térmicas y magnéticas de algunos materiales. En fábrica, se hicieron repetidas y precisas medidas del módulo de elasticidad de la bobina, parámetro fundamental para garantizar precisión en los cálculos mecánicos. Por último y antes del montaje final



FIGURA 9. Preparación del imán para ensayos en el CERN. (Foto INDAR).

del imán, el Sector de Técnicas Físicas instrumentó el imán con bandas extensiométricas para conocer con detalle las circunstancias de los diferentes procesos de ensamblado, obteniendo algunas conclusiones sumamente interesantes.

Una vez que el imán fue recepcionado por el CERN, se procedió a su ensayo, diferenciado en tres aspectos básicos: ensayo de «quench», resultando que el imán no ha tenido ninguno hasta la corriente nominal; ensayo magnético para estudiar la calidad de campo, encontrándose actualmente en fase de análisis con muy buenas perspectivas, y ensayo mecánico a partir de la información suministrada por las bandas extensiométricas que, aunque no son adecuadas para medir la temperatura criogénica, sí han mostrado tendencias acordes con los modelos de cálculo.

En la figura 9 se aprecia el imán antes de su inserción en el criostato para los ensayos.

Aunque aún es pronto para una evaluación detallada

de las pruebas y todavía se requieren algunos retoques de fabricación, la impresión general es muy satisfactoria, de manera que el diseño y la fabricación del imán quedan homologados para una fase posterior de producción en serie.

REFERENCIAS

1. PERIN, R. (1990). «Superconducting magnets for the LHC». *Europhysics News*, vol. 21.
2. GARCÍA-TABARES, L., y SIEGEL, N. (1992). «Spanish industries and CERN». *Particle World*, vol. 3, núm. 2.
3. GARCÍA-TABARES, L., y CUBERT, J. M. (1990). «Algunas consideraciones sobre el diseño de imanes superconductores». *Desafío Tecnológico*, núm. 91.
4. PERIN, R.; SIEGEL, N.; BIDAURAZAGA, H., y GARCÍA-TABARES, L. (1991). «Design and fabrication of the prototype superconducting tuning quadrupole and octupole correction winding for the LHC project». 12th Magnet Technology Conference, Leningrado.

EL CABLE "TODO TERRENO"



La presencia de agua en las canalizaciones subterráneas determina el futuro de la vida operativa de un cable. El agua puede penetrar y circular a lo largo del mismo llevando el riesgo de averías más allá de la zona lesionada.

HERSATENE WATER BLOCKING y VULPREN WATER BLOCKING son cables de media tensión con aislamiento seco, portadores de un sistema obturador a la propagación de la humedad mediante la aplicación de un compuesto en forma de polvo que tiene la facultad de expandir 100 veces su volumen, consiguiendo bloquear totalmente la circulación del agua.

El cable HERSATENE W.B. y VULPREN W.B. cumplen y superan las exigencias de las normativas nacionales e internacionales.

HERSATENE y VULPREN W.B., CABLES DE FIAR.



Grupo General Cable

División Energía

Casanova, 150 - 08036 Barcelona





INFRAESTRUCTURA Y TRANSPORTE

- CARRETERAS
- TRANSPORTES
- FERROCARRILES
- ESTRUCTURAS
- GEOLOGIA
- GEOTECNIA
- MEDIO AMBIENTE

DESGLOSE: MEDIOAMBIENTE
8 40 10




inypsa

INFORMES Y PROYECTOS, S.A.

General Díaz Portier, 49 • 28001 MADRID (ESPAÑA)
Tel. (91) 402 55 94 • 402 45 92 • Fax (91) 402 13 91
Plaza Fernando Lesseps, 33 • 08023 BARCELONA
Tel. (93) 415 00 17 • Fax (93) 218 65 35