

Diseño, fabricación y ensayos de un octupolo superférico corrector para el LHC

L. GARCÍA-TABARÉS, J. CALERO (*)
G. LAURENT, S. RUSSENSCHUCK, N. SIEGEL, M. TRAVERÍA (**)
P. AGUIRRE, J. ETXEANDÍA, J. GARCÍA (***)

RESUMEN En el esquema corrector del LHC está previsto instalar imanes correctores octupolares, en la sección recta corta de la red de imanes. Inicialmente estos correctores fueron devanados en el tubo frío dentro de los cuadrupolos de sintonía. Más tarde se cambió el prototipo octupolo por un nuevo diseño superférico compacto, compatible con una configuración dos-en-uno. Este prototipo fue diseñado por el CERN en colaboración con el CEDEX, construido en INDAR y ensayado en el CEDEX.

El artículo describe el diseño del prototipo, su fabricación y montaje y presenta los resultados obtenidos. Se ha puesto un especial interés en diseñar un imán sencillo y compacto, fácil de fabricar y libre de entrenamiento a campo nominal. Los primeros resultados obtenidos muestran la fiabilidad de la solución que deberá ser finalmente confirmada por las medidas magnéticas.

DESIGN, FABRICATION AND COLD TESTS OF A SUPERFERRIC OCTUPOLE CORRECTOR FOR THE LHC

ABSTRACT In the corrections scheme of the LHC it is planned to install octupole corrector magnets in the short straight section of the lattice. Initially these correctors were distributed windings on the cold bore tube nested in the tuning quadrupoles. The latter being suppressed a new compact superferric design was chosen for the octupole prototype, suitable for a two-in-one configuration. This prototype was designed by CERN and CEDEX/Spain, built at INDAR/Spain and tested at CEDEX.

The paper reports on the design of the prototype, describes the fabrication and assembly and presents the measurement results. Special interest has been taken to design a simple and compact magnet, easy to fabricate and training free below nominal field. First results show the feasibility of the solution which will be finally confirmed by magnetic measurement.

Palabras clave: Octupolo; Superférico; Imán superconductor; Bobina.

1. INTRODUCCIÓN

En el primer diseño de imanes correctores para el LHC, el octupolo estaba estrechamente relacionado con el cuadrupolo de sintonía siendo concebidos en la llamada "solución encajada" en la que el octupolo fue devanado en una ranura hecha a lo largo del tubo frío, en el interior de esos cuadrupolos [1].

Entre los inconvenientes de esta solución estaba la falta de espacio en sentido radial, el alto campo magnético en los devanados del octupolo y el uso del tubo de vacío como parte del imán, lo que llevaba a problemas de soldadura en un elemento muy crítico. Por otro lado esta solución representaba un ahorro de espacio, muy interesante, para el resto de los imanes del LHC donde el espacio longitudinal estaba muy restringido.

Esta aproximación se descartó después de la supresión del cuadrupolo de sintonía, que quedó obsoleto tras la decisión de alimentar independientemente el cuadrupolo principal.

Fueron previstas entonces dos alternativas: el llamado diseño coseno y el concepto superférico. El primero es la clásica disposición del conductor alrededor de una circunferencia, de acuerdo con una distribución coseno ideal de la corriente. El hierro en este tipo de imanes juega un papel secundario, reforzando ligeramente el campo en el interior y reduciendo la dispersión de flujo fuera del imán. En este diseño la precisión en el posicionamiento de los conductores, determina la calidad y el contenido de armónicos del campo magnético del imán. Su principal mérito está en su compactidad y el alto valor del campo conseguido sin saturar el hierro. Esto conduce a imanes más cortos para una intensidad de campo dada. Por otro lado el número de amperios-vuelta es alto, con muy poca contribución de campo desde el hierro.

La segunda alternativa es el concepto superférico (ver figura 1) basada en el uso de hierro para cerrar el circuito

(*) Sector Técnicas Físicas del CEDEX (MOPTMA).

(**) Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), Ginebra.

(***) INDAR, Basoah.

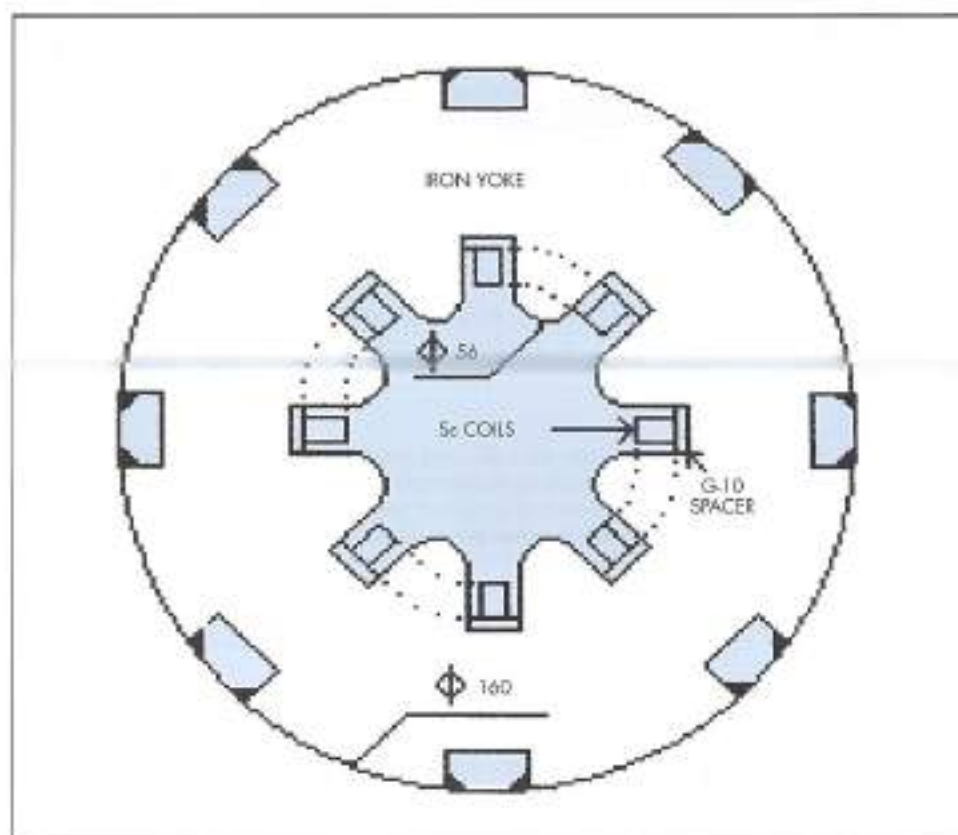


FIGURA 1. Sección transversal del octupolo superférico.

magnético, de forma que la geometría del campo está fijada por las condiciones límite dadas por la geometría del hierro. Esta clase de imanes superconductores ha sido ya propuesta y usada en HERA [2] y RHIC [3].

II. DISEÑO MAGNÉTICO

Como se ha visto previamente las dos características más importantes de los imanes superféricos son: a) el retorno completo del flujo magnético a través del hierro y b) la geometría del campo en el centro está fijada por el contorno del hierro. La primera condición, implica que la saturación magnética juega un papel primordial en el diseño de imanes y la densidad de flujo debe ser limitada a los valores estándar en los dispositivos magnéticos que usan hierro (<1.8 T).

La segunda condición, acentúa la importancia de la forma precisa de las caras internas del hierro para asegurar una alta calidad de campo, mientras reduce la necesidad del posicionamiento preciso de los conductores como en la solución cosp.

Aunque todos los cálculos magnéticos han sido hecho con software standard (COSMOS), algunas fórmulas básicas son muy útiles para hacer un diseño preliminar a partir de los principales parámetros especificados; la intensidad magnética del octupolo, OS, que en este caso es de 7200 Tm⁻² y la longitud magnética, l_m , 150 mm. Las relaciones entre OS, la densidad de flujo B en un radio r y l_m son:

$$OS = B_r l_m \quad (1)$$

$$B(r) = B_0 r^3 = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 B}{\partial x^3} r^3 \quad (2)$$

donde B_0 es la intensidad nominal del octupolo.

De acuerdo con la Fig. 2 B, la aplicación de la ley de Ampere a lo largo de la línea discontinua determinará los amperios-vuelta requeridos:

$$NI = \frac{B_0}{2\mu_0} a^4 \quad (3)$$

donde a es el radio del núcleo, 28 mm en nuestro caso. La Fig. 2, también muestra dos posibles soluciones para el diseño y construcción de las bobinas. La alternativa A utiliza bobina plana de lados paralelos, mientras que en la solución B ambos lados de la bobina están a 45°.

La principal ventaja de la solución A, es la simplicidad de la bobina, aunque hay una falta de simetría en el posicionamiento del conductor y se necesita una ranura más grande para situar la bobina, incrementando la densidad de flujo en el polo de hierro.

Por razones que se discutirán más tarde, la solución B fue la elegida finalmente. El campo máximo dentro de la bobina viene dado, con una buena aproximación, por la siguiente expresión:

$$B_r = \frac{B_0}{2g} a^4 \quad (4)$$

La última ecuación básica para el diseño preliminar, define la geometría del polo como un equipotencial magnético. En coordenadas polares el contorno del polo está dado por:

$$r^4 \cos(4\theta) = a^4 \quad (5)$$

La aplicación de (1), (2), (4) y (5) nos da una densidad de flujo en la esquina interior de la ranura de 1.6 T y el campo máximo en el conductor es de 1.5 T. La ecuación (3)

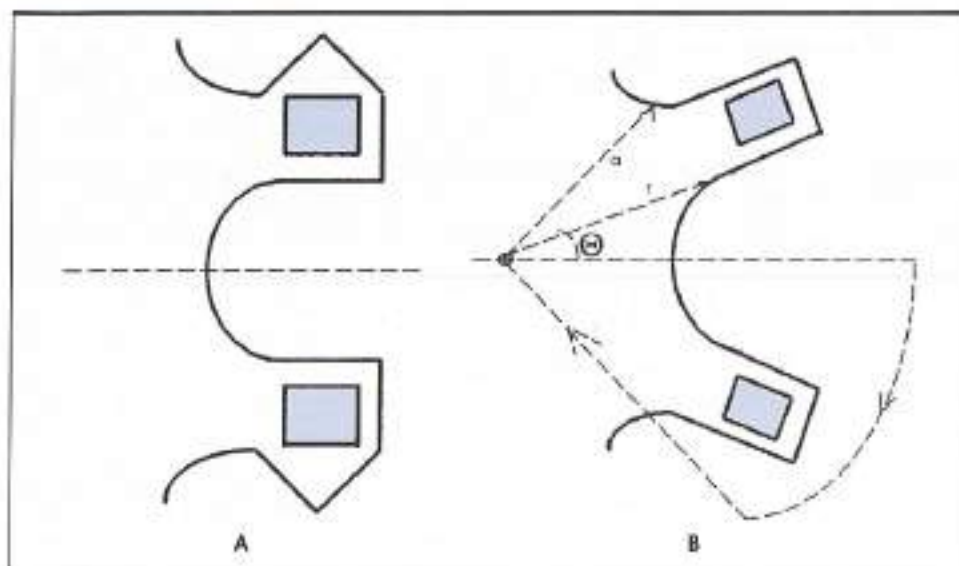


FIGURA 2. Cálculo de los amperios-vuelta y dos posibles disposiciones para bobinas.

nos proporciona los amperios-vuelta necesarios, en este caso 11740 A-v. Las siguientes consideraciones proporcionaron la elección del número de vueltas y el tamaño del conductor, por una parte la corriente no podía pasar de 250 A debido a consideraciones operativas, incluyendo el tamaño de la fuente de alimentación y las barras de transporte. Por otro lado, el punto de trabajo del imán fue elegido bastante bajo por razones de seguridad. Como este era un prototipo de viabilidad, se eligió un cable estándar por su disponibilidad y su corto plazo de entrega. El diseño final del hilo, si se lleva a cabo esta solución, deberá incre-

mentarse la relación Cu/Se por razones de protección de quench y se reducirá el diámetro del filamento para reducir las pérdidas A.C.

La Fig. 3 representa la línea de carga y la curva de corriente crítica. Puede verse que la saturación es importante en la definición de la línea de carga del imán. La curva de corriente crítica del superconductor está dada para 4.2 K, temperatura a la que ha sido probado el imán.

De la Fig. 3 se puede calcular una corriente crítica de 948 A, correspondiente a un campo máximo de 3.58 T en las bobinas.

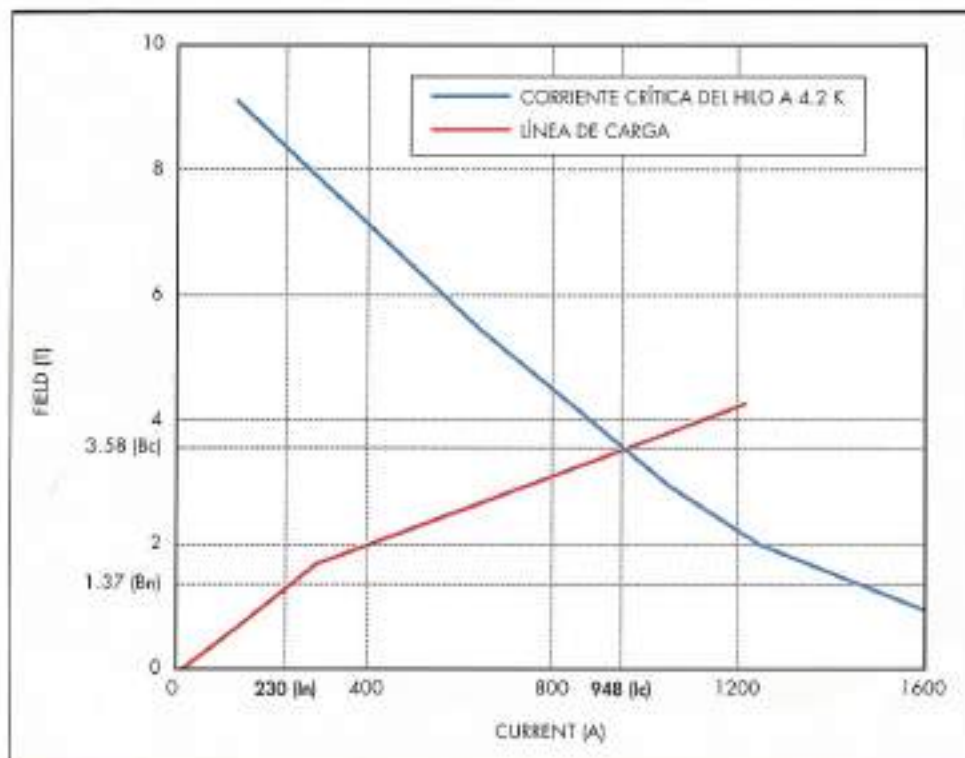


FIGURA 3. Línea de carga del imán y corriente crítica.

PARÁMETROS DEL IMÁN	
Apertura (radio)	28 mm
Intensidad nominal	48000 Tm ⁻²
Longitud magnética	150 mm
Longitud total	190 mm
Corriente nominal	230 A
Vueltas por bobina	51
Campo máximo en la bobina	1.37 T
Autoinducción a corriente nominal	4.17 mH
Diámetro del conductor (desnudo)	0.85 mm
Diámetro del filamento	77 µm
Número de filamentos	54
Relación Cu/Sc	1.35

TABLA 1. Resumen de los principales parámetros del imán y del cable.

La corriente nominal, hallada también por cálculos F.E.M. para conseguir el valor de campo teórico para $r = 20$ mm es 230 A lo cual representa el 24% de la corriente crítica. Este valor debe garantizar un imán libre de entrenaamiento en caso de una producción en serie y una adecuada protección de "Quench" como se discute en la sección V.

La Fig. 4 muestra una salida F.E.M. del valor absoluto de la densidad de flujo en un polo del imán.

Para economizar, solamente se han utilizado cuatro bobinas para excitar los ocho polos. Esto provoca un armónico de orden superior en los extremos del imán. Para reducir estos armónicos no deseados se prevé un diseño especial de los extremos de cada polo.

III. DISEÑO MECÁNICO

Una de las principales características de este imán, es su simplicidad desde el punto de vista mecánico, basado en el hecho de que las bobinas no necesitan pretensión ni soporte especial, así como del hecho que el conductor está siempre trabajando bajo compresión. Conociendo el campo magnético, las tensiones que aparecen por fuerzas de Lorentz en la sección recta se calculan suponiendo un decremento lineal de la densidad de flujo a lo largo del radio del imán. El máximo esfuerzo de compresión está dado por la fórmula:

FIGURA 4. Densidad de flujo para medio polo del imán. Están indicados los valores máximos en la bobina y en el hierro.

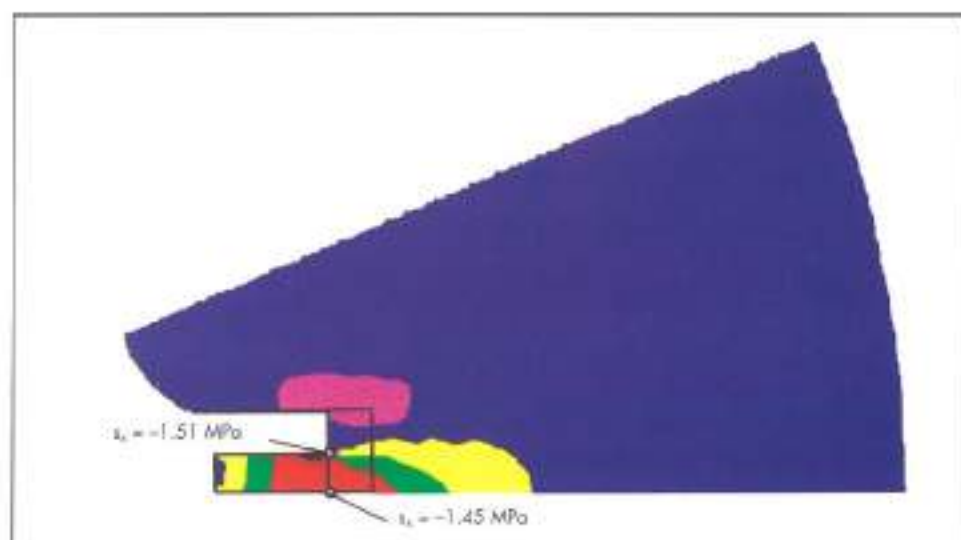
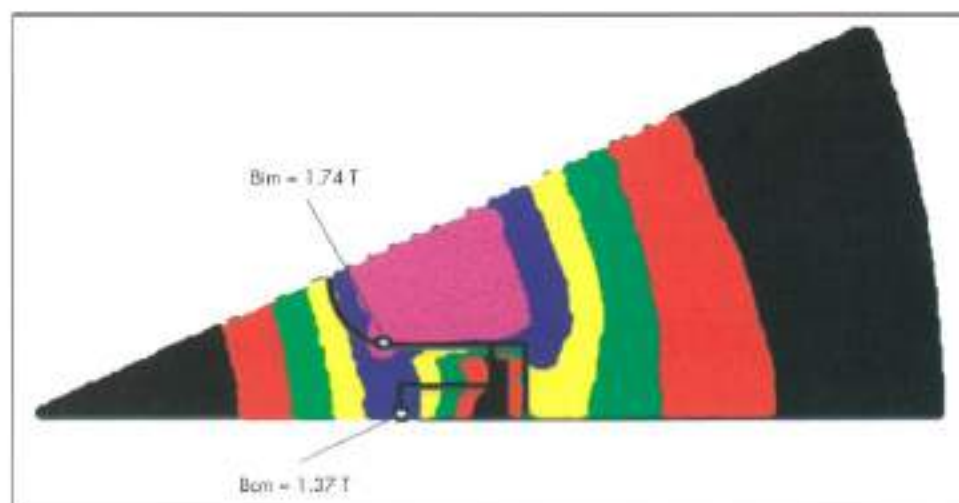


FIGURA 5. Distribución de esfuerzos para medio polo del imán. Se muestran los valores de la frontera bobina/espaciador.

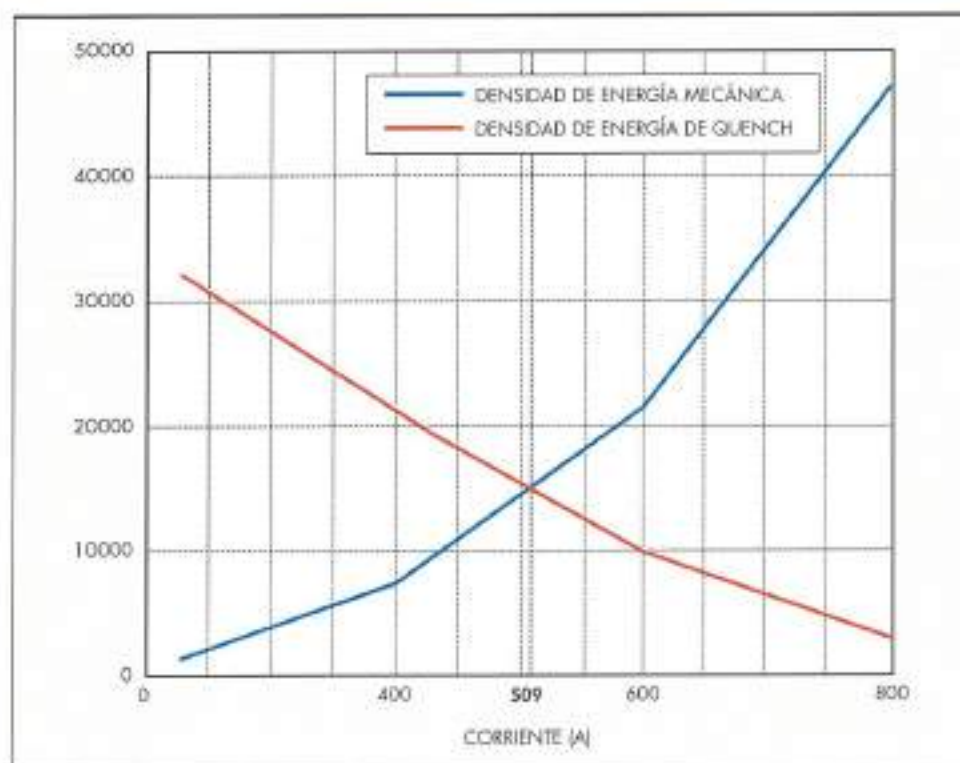


FIGURA 6. Densidad de energía mecánica frente a densidad de energía de "Quench".

$$\sigma_{\text{m}} = \frac{B_{\text{en}} NI}{2h} \quad (6)$$

donde B_{en} es la máxima densidad de flujo en la bobina y h es el ancho de la bobina, 4.8 mm para nuestro imán.

De (6) hallamos $\sigma_{\text{m}} = 1.67$ Mpa, mientras los cálculos F.E.M. dan un valor de 1.59 Mpa.

Cuando se considera la contracción térmica, aparecen nuevos esfuerzos en la bobina. Los esfuerzos principales han sido calculados también por F.E.M., y la Fig. 5 muestra su distribución en la dirección radial.

Debido a la baja magnitud y al signo de los esfuerzos (de compresión) no se ha diseñado zunchos para compresión radial. Las bobinas están simplemente pegadas con el espaciador de G-10 y este a su vez también pegado al fondo de la ranura.

Es interesante calcular la densidad de energía mecánica en el bobinado para la distribución total de esfuerzos. Este cálculo ha sido hecho suponiendo un comportamiento mecánico lineal de la bobina. Como módulo de Young se tomó 15000 Mpa. La densidad de energía mecánica proporciona un valor de la energía potencial, que puede ser liberada de forma no reversible dentro de la bobina. Este valor está comparado en la Fig. 6 con densidad de energía necesaria para disparar un "Quench" en el llamado "bobinado normal" a campo cero [4]. Se deduce de la intersección de ambas curvas que más allá de 509 A (59% de la corriente crítica) el imán es potencialmente capaz de desarrollar un "Quench".

IV. CONSTRUCCIÓN DEL IMÁN

Este prototipo fue fabricado por INDAR dentro del marco de un convenio de colaboración con el CERN. Se fabricó con la mitad de la longitud del diseño final para simplificar la

construcción, permitiendo al mismo tiempo comprobar el proceso de fabricación.

El yugo (núcleo de hierro) fue hecho en el CERN apilando 30 láminas de una pieza, cortadas por electroerosión soldadas juntas y alineadas a través de 8 varillas externas. Esta configuración proporciona un fácil y rápido montaje del yugo con las tolerancias mecánicas precisas.

Las cuatro bobinas fueron bobinadas en una mesa con movimientos en dos ejes. Cada bobina fue impregnada mientras se bobinaba y curada siguiendo las especificaciones de la resina. Las bobinas fueron probadas y montadas en el imán usando una herramienta especial.

Antes que el imán fuera fabricado se construyeron 2 modelos de bobinas según las soluciones A y B que se mencionan en la Sección II. Cada uno de esos modelos consistía en una bobina pegada a un hierro similar a un polo del imán. Ambos tuvieron resultados semejantes como se describe en la sección V. Deduciendo que la forma de la bobina no es un factor importante para las características del "Quench". Por razones mecánicas y magnéticas se decidió escoger bobinas no planas a pesar de su mayor complejidad de fabricación. En la Fig. 7 vemos una fotografía del imán después del montaje final.

V. PRUEBAS FINALES

El comportamiento en las pruebas de los dos modelos de bobinas, tanto el A (bobina plana) como el B (bobina con sección en V), muestra que ambos tuvieron su primer "Quench" alrededor de 1.5 veces su valor de corriente nominal que era de 230 A, mientras que la corriente crítica era de 1000 A.

El imán final fue ensayado en dos tandas. La Fig. 8 muestra los resultados de ambas. El primer "quench" se produjo a los 528 A, 2.4 veces la corriente nominal en la

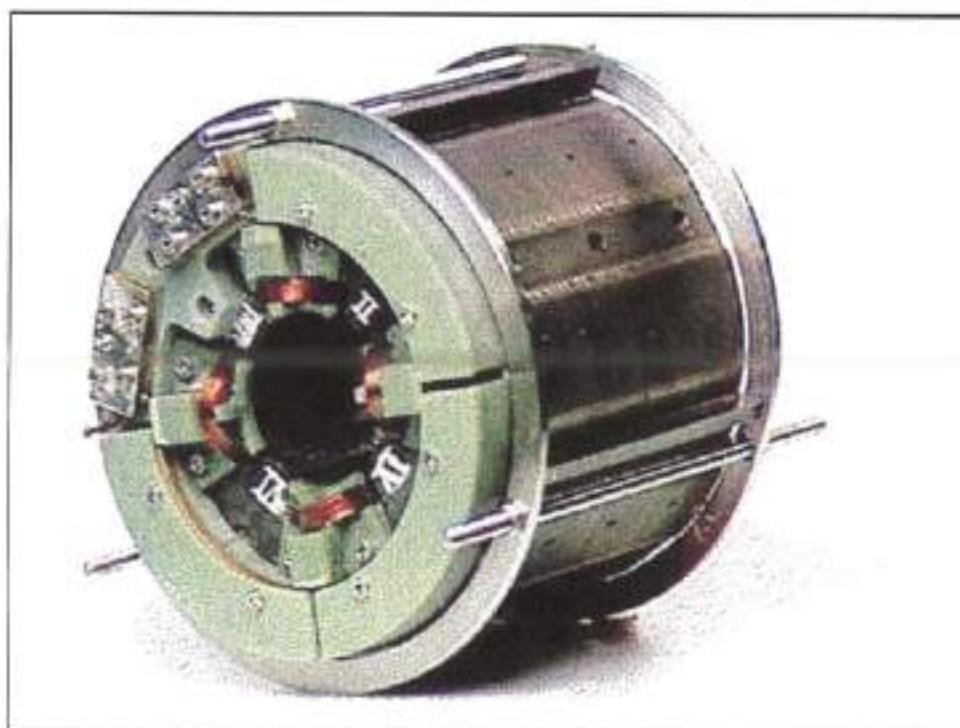


FIGURA 7. Imán después del montaje final.

primera prueba y 627 en la segunda. La máxima corriente en las pruebas se limitó a la de la fuente de alimentación (850 A).

Se colocaron terminales de tensión en las conexiones de cada polo para poder grabar la evolución de la tensión durante el desarrollo de cada "Quench". También fue medida y registrada la corriente. En la Fig. 9 se pueden ver estas dos señales durante el tercer "Quench" del segundo ensayo.

Los dibujos de la caída de la corriente se emplean para el cálculo de los MIT's de las bobinas y de este modo se deduce la temperatura de los puntos calientes a partir de las características del devanado. Usando este método se calculó una temperatura en el punto caliente 70 K. Una vez optimizada la relación cobre/superconductor en el cable, un solo octupolo debe ser capaz de absorber el total de energía de una familia de octupolos (12 imanes), evitando así una protec-

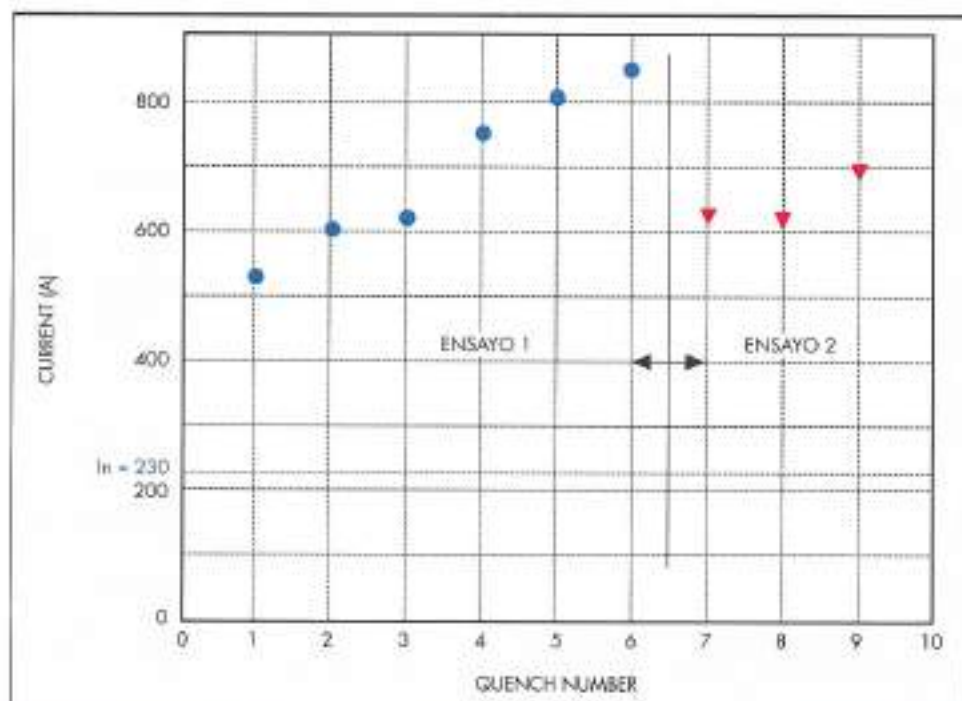


FIGURA 8. Octupolo superférico. Gráfico de "Quench".

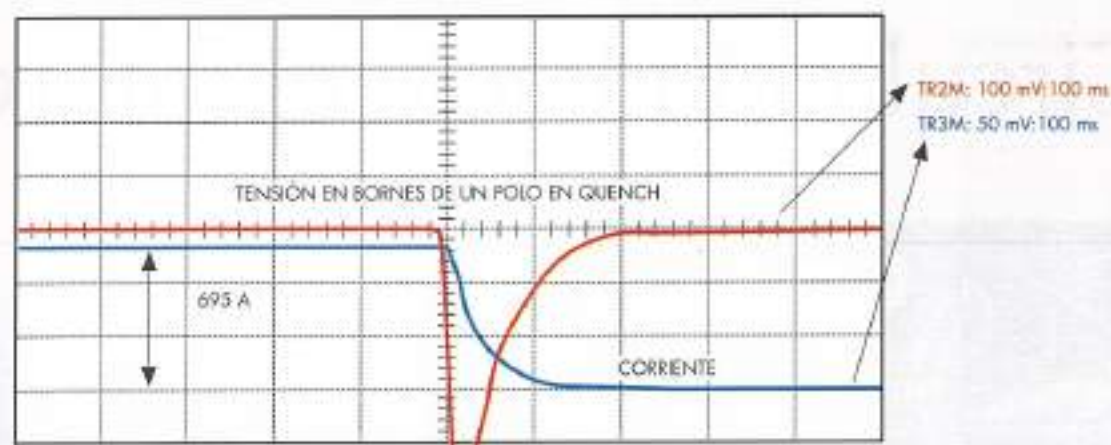


FIGURA 9. Evolución de tensión y corriente después de un quench.

ción individual para cada imán.

Las medidas magnéticas serán realizadas en el CERN para validar el diseño del imán.

VI. CONCLUSIONES

El CERN junto con el CEDEX han diseñado un imán octupolo corrector, que ha sido construido por INDAR y probado en las instalaciones del CEDEX en el marco de un acuerdo de colaboración con el CERN.

El diseño estaba enfocado a desarrollar un imán simple, fácil de fabricar y libre de entrenamiento en caso de tener que hacer fabricación en serie. El diseño está basado en el uso de cuatro bobinas solamente, que están sujetas al yugo con pegamento a través de un espaciador de fibra de vidrio con epoxy. No se prevén elementos de pretensado ya que el conductor siempre trabaja bajo fuerzas de compresión.

Por otro lado se deben hacer ensayos cíclicos para validar este concepto.

Desde el punto de vista del entrenamiento se obtuvieron buenos resultados al tener el primer "quench" a 2.4 veces la corriente nominal. La optimización del cable conductor debería permitirnos incrementar el margen de seguridad del imán en caso de "Quench".

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la ayuda del Grupo de Superconductividad Aplicada del CEDEX, especialmente de M^o José Sáenz de Buruaga y Márta Bajkó durante la realización de los ensayos del imán.

REFERENCIAS

- [1] R. PERIN; N. SIEGEL; H. BIDAURRÁZAGA y L. GARCÍA TABARES (1981). "Proyecto de diseño y fabricación de un prototipo Cuadropolo corrector de sintonía superconductor para el LHC" presentado en la 12^a Conferencia Internacional de Tecnología de Imanes, Leningrado.
- [2] C. DAUN y otros (1988). "Imanes correctores superconductores para el anillo de almacenamiento de protones HERA", Conferencia Europea de aceleradores de Partículas, Roma.
- [3] P. THOMSON y otros (1995). "Sectupolos correctores y Cuadropolos de sintonía para el «Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)», Conferencia de Aceleradores de Partículas y Conferencia Internacional de Aceleradores de Altas Energías, Dallas.
- [4] M. N. WILSON (1986). "Imanes Superconductores", Clarendon Press, Oxford.

Circulando hacia el futuro



1



2



3

1. Distribuidor norte en la M-40, Madrid.
2. C.N. 632, Las Dueñas-Novellana, Asturias.
3. Autovía Almaraz-Jaraicejo, Cáceres.



**CUBIERTAS
INTERNACIONAL**



CUBIERTAS
Y MZOV, S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES