

Solenoid superconductor de 10 tesla para almacenamiento de energía eléctrica

LUIS GARCIA-TABARES RODRIGUEZ (*)
JAIME TAMARIT RODRIGUEZ (*)

RESUMEN. En este artículo se hace una descripción tanto del diseño como de la construcción del primer imán superconductor de alto campo fabricado en España.

Esta realización es parte de un acuerdo suscrito entre cuatro instituciones; el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), el consorcio de empresas ACICA, el programa de Movilización de la Investigación, el Desarrollo y las Aplicaciones de los Superconductores (MIDAS) y el propio CEDEX, para construir un pequeño prototipo de Almacenador Superconductor Magnético de Energía (SMES) para amortiguar las oscilaciones de la red eléctrica.

Se hace una descripción detallada de los cálculos tanto magnéticos como eléctricos, así como de algunos aspectos tecnológicos de su construcción de suma importancia para el correcto funcionamiento del imán.

El diseño del imán ha sido realizado por el Sector de Técnicas Físicas y Electrónicas del CETA, con la colaboración de otros departamentos que ayudaron en ciertos cálculos o midiendo algunos parámetros mecánicos de la bobina, de extrema importancia para su diseño.

Finalmente, se describen las primeras pruebas del imán hechas en Zaragoza con unos resultados excelentes.

10 TESLA SUPERCONDUCTING SOLENOID FOR ENERGY STORAGE

ABSTRACT. The present report is a description of the design and construction of the first field superconducting magnet built and tested in Spain.

The project is part of a common agreement between four Institutions; the Institute for Science of Materials of Aragón (ICMA), the group of enterprises ACICA, the program for applied superconductivity MIDAS and the CEDEX, to build a small prototype of a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for compensating electrical grid oscillations.

A detailed description of the magnetic and mechanical calculations is presented, as well as some technological aspects of the construction, which were extremely important for the proper running of the magnet.

The «Sector de Técnicas Físicas del CETA» from CEDEX, has carried out the design of this magnet with the collaboration of other departments which helped in doing some calculations or prepared experiments to evaluate mechanical properties of the coil of the magnet, extremely useful for mechanical computation.

Also the first tests of the magnet at Zaragoza are described, and how its behaviour was highly satisfactory.

1. INTRODUCCION

En abril de 1991, se firmaba un convenio de colaboración entre el CEDEX y tres organismos más, el consorcio de empresas ACICA, el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA) y el programa de Movilización de la Investigación, el Desarrollo y las Aplicaciones de los Superconductores (MIDAS), para la construcción de un pequeño acumulador de energía eléctrica

basado en la utilización de un imán superconductor de campo intenso y un rectificador controlado como elemento inyector y extractor de la corriente en la bobina.

Exactamente un año más tarde se probaba con éxito este imán superconductor, que era el primero totalmente diseñado, construido y ensayado en nuestro país.

Mientras que su diseño ha sido realizado en el CEDEX por los autores de este artículo con la colaboración de técnicos de la empresa fabricante, su construcción ha sido realizada en la empresa AME del grupo ACICA,

(*) Sector de Técnicas Físicas y Electrónicas del CETA.

bajo nuestra supervisión y los ensayos llevados a cabo en las instalaciones del ICMA en Zaragoza.

Por otra parte, el rectificador controlado encargado de inyectar y extraer la energía del imán ha sido diseñado también en el sector de técnicas físicas del CETA y será construido por la empresa ABENGOA, del grupo ACICA.

2. LA SUPERCONDUCTIVIDAD APLICADA. EL ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

Como es sabido, la superconductividad es una propiedad física de algunos materiales, por la que su resistencia al paso de una corriente eléctrica desaparece por debajo de una cierta temperatura.

Aunque se descubrió en 1911, su aplicación práctica no se ha producido hasta hace poco más de 20 años, cuanto intensas investigaciones permitieron poner a punto cables realizados con superconductores del llamado tipo II, capaces de permanecer en estado superconductor en presencia de campos magnéticos intensos o con elevadas corrientes de transporte.

En efecto, la propiedad que tiene un material para hacerse superconductor, depende del campo magnético en el que está inmerso, la densidad de corriente que está transportando y la temperatura a la que está sometido. En los primeros superconductores que se descubrieron, que eran metales puros, la propiedad superconductora

desaparecía rápidamente en presencia de campos magnéticos débiles o con poca corriente transportada. Después de muchos años de intensos trabajos se pudieron poner a punto cables superconductores con aplicación práctica, que los hiciese una alternativa ventajosa, en algunos casos, a los conductores convencionales.

La figura 1 muestra la superficie crítica en función de la densidad de corriente, J , el campo, B , y la temperatura, T , para el Níobio-Titanio, uno de los superconductores industriales más usados. En cualquier punto situado entre el triedro de coordenadas y la superficie crítica, el material es superconductor, fuera deja de serlo.

Recientemente, se han desarrollado superconductores de alta temperatura crítica, superior a la de licuefacción del nitrógeno líquido, pero que todavía distan de estar disponibles para uso industrial.

Las aplicaciones de los dispositivos superconductores de potencia son muy variadas y se encuentran allí donde, o bien se necesiten campos magnéticos intensos, o bien un importante y justificado ahorro de energía aprovechando que los dispositivos superconductores no disipan energía por efecto Joule.

Entre los usos más destacados están la fabricación de grandes imanes para aceleradores de partículas, separadores magnéticos, tracción y levitación en trenes de muy alta velocidad almacenadores de energía, fusión nuclear, resonancia magnética nuclear, etc.

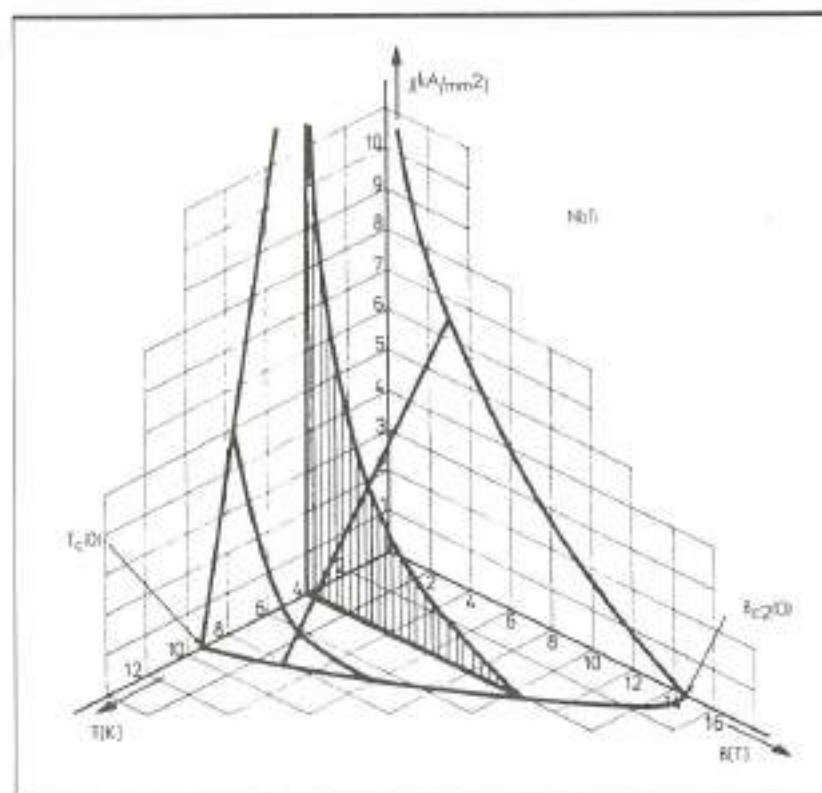


FIGURA 1. Relación densidad de corriente, temperatura, campo magnético para el NbTi.

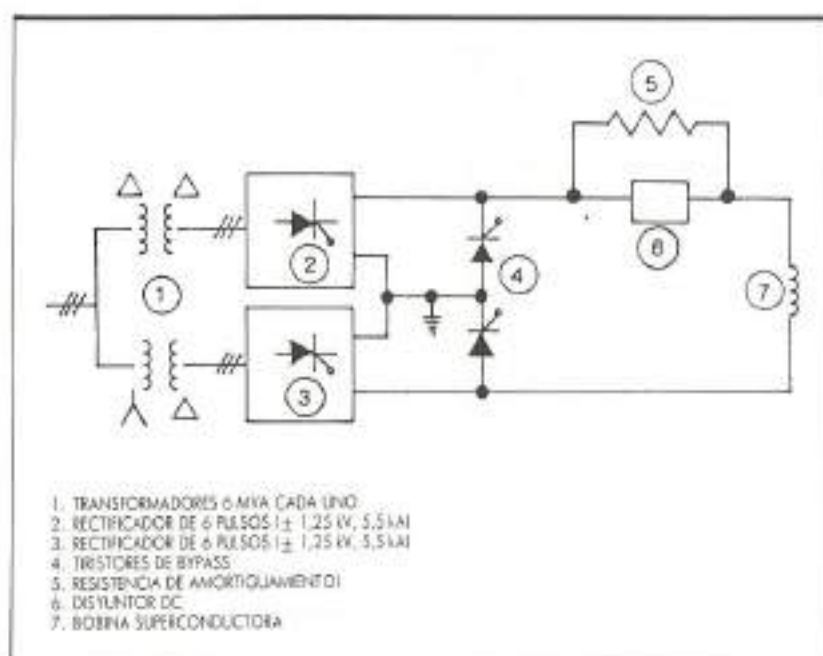


FIGURA 2. Esquema básico para un almacenador de energía.

Existen también otras aplicaciones de carácter no industrial como imanes individuales para experimentos científicos o aplicaciones muy interesantes en baja potencia, como sensores de altísima sensibilidad (SQUIDS) o circuitos para ordenadores.

Una de las aplicaciones citadas y que ha sido el objeto de este desarrollo es el almacenamiento de energía eléctrica en el campo magnético de un imán superconductor que, cuando se desea, puede devolverse a la red eléctrica.

Dos son las aplicaciones básicas de estos dispositivos. Una, regular las puntas de consumo eléctrico a base de almacenar energía durante la noche y devolverla a la red durante el día, cuando el consumo es máximo y las plantas productoras están más saturadas. Otra aplicación es la de estabilizar las oscilaciones de redes eléctricas cuando aparecen faltas o distribuciones de carga inestables, lo que se hace a base de inyectar o extraer potencia activa o reactiva en la red.

Para ambas aplicaciones se utiliza un imán superconductor de elevada autoinducción y corriente, conectado a la red eléctrica a través de un rectificador controlado que, cuando inyecta potencia a la bobina, funciona como rectificador, y cuando la extrae, como ondulador. La figura 2 representa el esquema de una de estas instalaciones que se montó en una subestación cerca de Seattle en Estados Unidos.

3. ASPECTOS GENERALES DEL IMÁN DESARROLLADO

Se trata de un solenoide de 40 mm de diámetro interno,

bobinado sobre carrete con hilo superconductor de Niobio-Titanio.

La bobina tiene un total de 13.130 espiras bobinadas en 60 capas en anchura y 220 en altura. La longitud total necesaria de cable ha sido de 3.600 m.

Tiene una autoinducción de 4,6 henrios y una capacidad de almacenamiento de energía de 33.000 Julios cuando circula una corriente de 120 Amperios. Finalmente, el campo máximo que se alcanza en el eje de la bobina es de 10,7 Teslas para esa corriente y una temperatura de trabajo de 2,2 grados Kelvin.

Desde el punto de vista constructivo, la bobina está devanada sobre un carrete de acero inoxidable con las alas soldadas y el bobinado usa la técnica llamada de impregnación húmeda, es decir, que a medida que el hilo se lleva a su posición, se va impregnando con resina epoxy que, una vez acabado el imán, polimeriza en un horno de 120 grados.

En apartados posteriores se hará una descripción más detenida del diseño, tanto magnético como mecánico.

La figura 3 muestra las dimensiones principales de la bobina.

3.1. DISEÑO MAGNÉTICO DE LA BOBINA

Dado que la aplicación que se le quería dar a este primer prototipo de bobina no sólo era como almacenador de energía sino también como imán con el que hacer medidas de mucha precisión en un experimento del efecto Hall cuántico, se marcaron dos objetivos prioritarios:

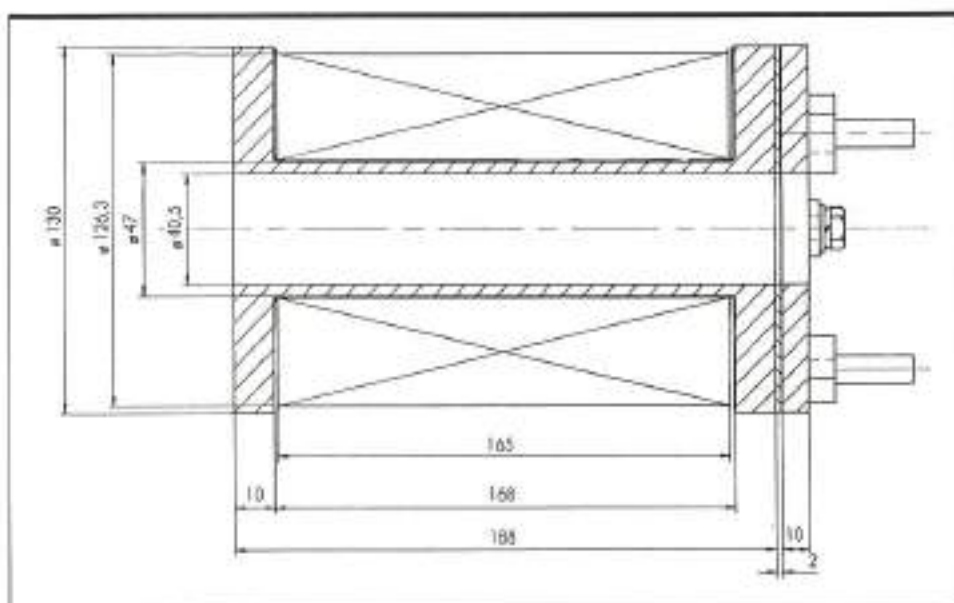


FIGURA 3. Plano de dimensiones principales del imán.

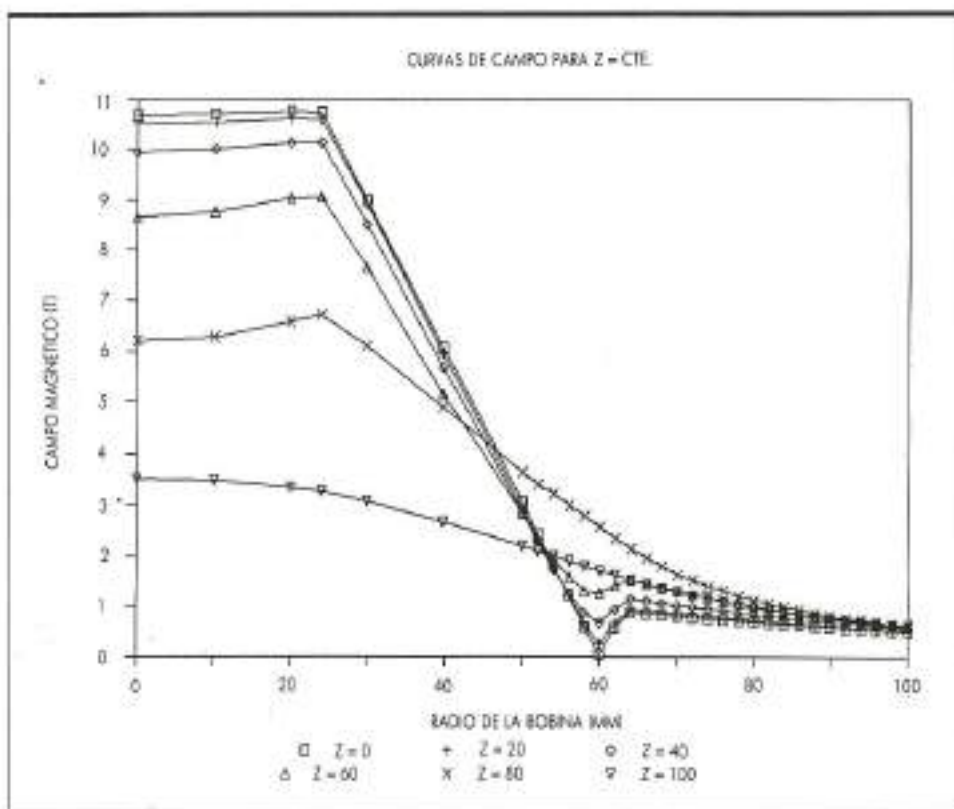


FIGURA 4. Curvas de distribución de campo en la bobina.

obtener un campo magnético muy homogéneo cerca del centro de la bobina y conocer su distribución con precisión en todo el espacio, especialmente en la zona del cable, para poder elegir sus dimensiones y garantizar

que siempre permanezca por debajo de la densidad de corriente crítica y en ningún momento se pierda la propiedad superconductora.

A tal efecto se confeccionó un programa de cálculo

magnético, que, a partir de las expresiones del potencial vector para una corriente circular filamentaria, calcula la distribución del campo en el espacio. El programa también hace una optimización del diseño de la bobina para conseguir la homogeneidad requerida en una esfera central en el centro geométrico de la bobina. Finalmente, el programa calcula la autoinducción total de la bobina.

El procedimiento de cálculo magnético es iterativo. A partir de los datos de homogeneidad y autoinducción necesarias, así como del campo máximo previsto, se elige un cable de determinadas dimensiones, con una cierta densidad de corriente. Se calcula la distribución de campo y se optimiza la geometría de la bobina hasta cumplir las especificaciones magnéticas. Se comprueba el campo máximo en el interior del cable y se verifica que el que se ha elegido puede trabajar sin pérdida de la superconductividad.

La figura 4 muestra una distribución del campo a lo largo de un eje horizontal de la bobina para diferentes alturas. Puede apreciarse un máximo donde empieza la espira más interior, con el que hay que contar para elegir el cable superconductor.

En cualquier imán superconductor, el punto de funcionamiento está descrito por la intersección de la recta de carga del imán (campo máximo en función de la corriente que los atraviesa) con la curva de corriente crítica del cable (máxima corriente que puede transportar el cable frente al campo en el que está inmerso). La figura 5 representa estas dos curvas para la bobina.

3.2. DISEÑO MECANICO

Un aspecto esencial cuando se diseña un imán superconductor es el mecánico, porque durante su funcionamiento no puede admitirse el más mínimo desplazamiento del cable, pues esto implicaría una disipación local de energía que aumentaría la temperatura y llevaría al imán al estado normal. Es lo que se conoce como fenómeno del «quench».

Dada la estructura particular de este imán, el objetivo anterior se traduce en el siguiente principio mecánico: no pueden existir esfuerzos radiales a tracción dentro del devanado, puesto que la resina que separa los conductores radialmente, no puede trabajar en ese sentido sin romperse. En sentido tangencial, sin embargo, el cable puede trabajar perfectamente.

Es muy importante, también, conocer los esfuerzos cortantes que aparecen entre la capa interna del bobinado y la pared del carrete, porque si son mayores que el máximo que puede soportar la impregnación ayudada por la presión del hilo sobre el carrete, aparecerán movimientos que llevarán la bobina al «quench».

Sin embargo, para poder hacer los cálculos de esfuerzos en la bobina, es necesario conocer su módulo de elasticidad tanto en sentido radial como tangencial, dado que el bobinado se comporta como un material tremendamente anisótropo. Para poder conocer principalmente el módulo de Young en sentido radial se llevó a cabo un ensayo de compresión en el laboratorio de Geotecnia del CEDEX, en el que se aplicaban presiones y se medían deformaciones a una bobina sin carrete.

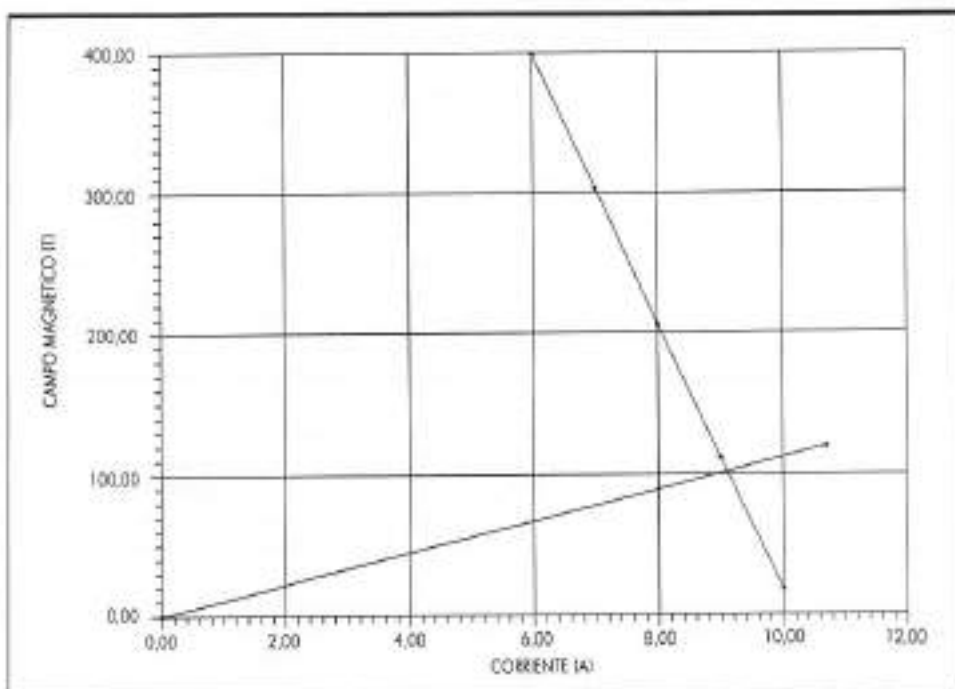


FIGURA 5. Recta de carga y corriente crítica en el imán.

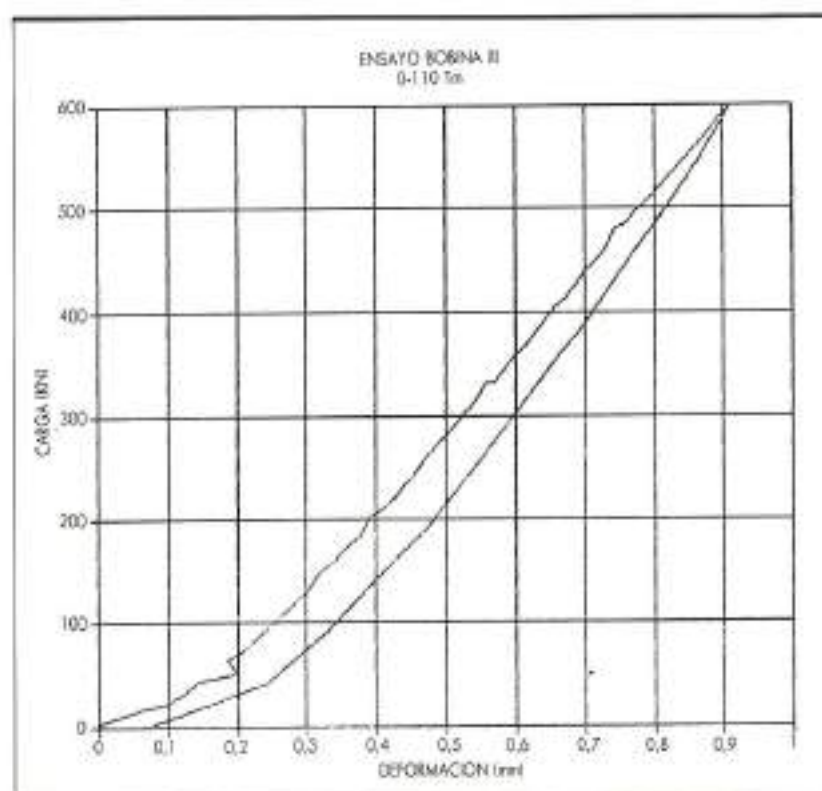


FIGURA 6. Ensayo de módulo de elasticidad del devanado.

especialmente construida para este fin. La figura 6 muestra los resultados de este ensayo.

Otro dato decisivo para el diseño mecánico es la determinación de las contracciones térmicas integrales entre temperatura ambiente y temperatura criogénica, que, si bien se conoce para el acero inoxidable o el material superconductor, es totalmente desconocido para el bobinado final, pues depende del aislamiento del cable y de la cantidad de resina final que contenga. En el Programa de Aplicaciones Nucleares del CETA, se hicieron ensayos de contracción con ayuda de extensómetros mecánicos del Laboratorio Central de Estructuras, que han resultado fundamentales para el diseño final de la bobina.

Una vez conocidos estos datos, el problema esencial del diseño consiste en establecer a qué tensión mecánica debe bobinarse para el que devanado quede precomprimido a una tensión tal que a pesar de las tracciones que aparecen cuando circula corriente por la bobina, cualquier punto siga trabajando a compresión.

Para poder conseguir este objetivo fue necesario desarrollar un programa de cálculo mecánico capaz de evaluar los esfuerzos en el conductor debidos a los tres conceptos: fuerzas electromagnéticas, contracciones térmicas y tensiones de bobinado. La figura 7 representa una salida de este programa con los esfuerzos para diferentes condiciones; sólo con corriente y el cable sin

tensionar, sólo el efecto de tensión del cable a temperatura ambiente y la suma de todos, incluyendo los térmicos.

Como puede verse, en este último caso, que es el de funcionamiento real, todos los puntos de la bobina trabajan a compresión.

Los cálculos anteriores están basados en la hipótesis de bobina de longitud infinita sin alas en el carrete. Su presencia, sin embargo, rigidiza la estructura y puede modificar la distribución de esfuerzos.

Para evaluar su importancia, el Departamento de Ingeniería Computacional del CETA calculó las deformaciones del carrete rigidizado por las alas, como se muestra en la figura 8. Sólo en una zona muy próxima a estas alas, el modelo de longitud infinita no es válido, pero en el resto de la bobina, los resultados coinciden plenamente.

Finalmente, el último punto importante a considerar desde el punto de vista mecánico es la elección del espesor de la pared del carrete. Por una parte interesa que sea lo más delgada posible para tratar de acercar los amperios-vuelta a la zona donde se requiere un campo intenso, pero por otra parte, una pared excesivamente delgada puede colapsar el cilindro, que trabaja a compresión, por pandeo. Es por tanto necesario hacer un cálculo para encontrar el espesor mínimo admisible para el carrete.

4. CONSTRUCCION Y ENSAYOS

Los resultados finales del cálculo determinan las dimensiones principales de la bobina y la tensión mecánica de devanado del hilo.

A partir de ahí, es necesario definir los detalles y elementos auxiliares que pueden tener una importancia decisiva en el comportamiento del imán.

A tal efecto la empresa constructora de la bobina desarrolló un programa de pruebas y diseños parciales para ir poniendo a punto las diferentes técnicas constructivas: se modificó y puso a punto una mesa de devanado ya existente, se ensayaron distintas técnicas de impregnación y curado hasta elegir la óptima, se diseñaron distintos tipos de conexiones externas así como una toma intermedia para la detección del «quench» y paralelamente se puso a punto una técnica de fabricación de bobinas sin carrete que resultó ser definitiva para los ensayos de módulo de Young y contracción térmica.

Es de destacar que una vez definido el diseño y puestas a punto las técnicas de fabricación, la construcción

de la bobina no llevó más de dos semanas frente a casi un año de trabajos de cálculo y puesta a punto de procesos tecnológicos.

Construida la bobina, el siguiente y definitivo paso es el de su ensayo, cuyo objetivo final es comprobar que se llega a la corriente nominal sin que la bobina pierda el estado superconductor. Sin embargo, todo imán superconductor tiene un comportamiento muy especial cuando se ensaya por primera vez, de forma que antes de llegar a la corriente nominal de funcionamiento se producen varios «quenches» o transiciones súbitas al estado normal, por movimientos del cable que tiende a buscar su posición de equilibrio. Este fenómeno se conoce como el entrenamiento de la bobina, de forma que cuantos menos «quenches» prematuros haya mejor es el diseño, por una parte, y cuanto más cerca se quede, al final del entrenamiento, de la corriente crítica del cable, tanto mejor el diseño, por otra. Evidentemente este límite de corriente crítica, que es una propiedad intrínseca del superconductor, no puede superarse.

Las pruebas de la bobina se realizaron en las instalaciones que el Instituto de Ciencia de Materiales de Ara-

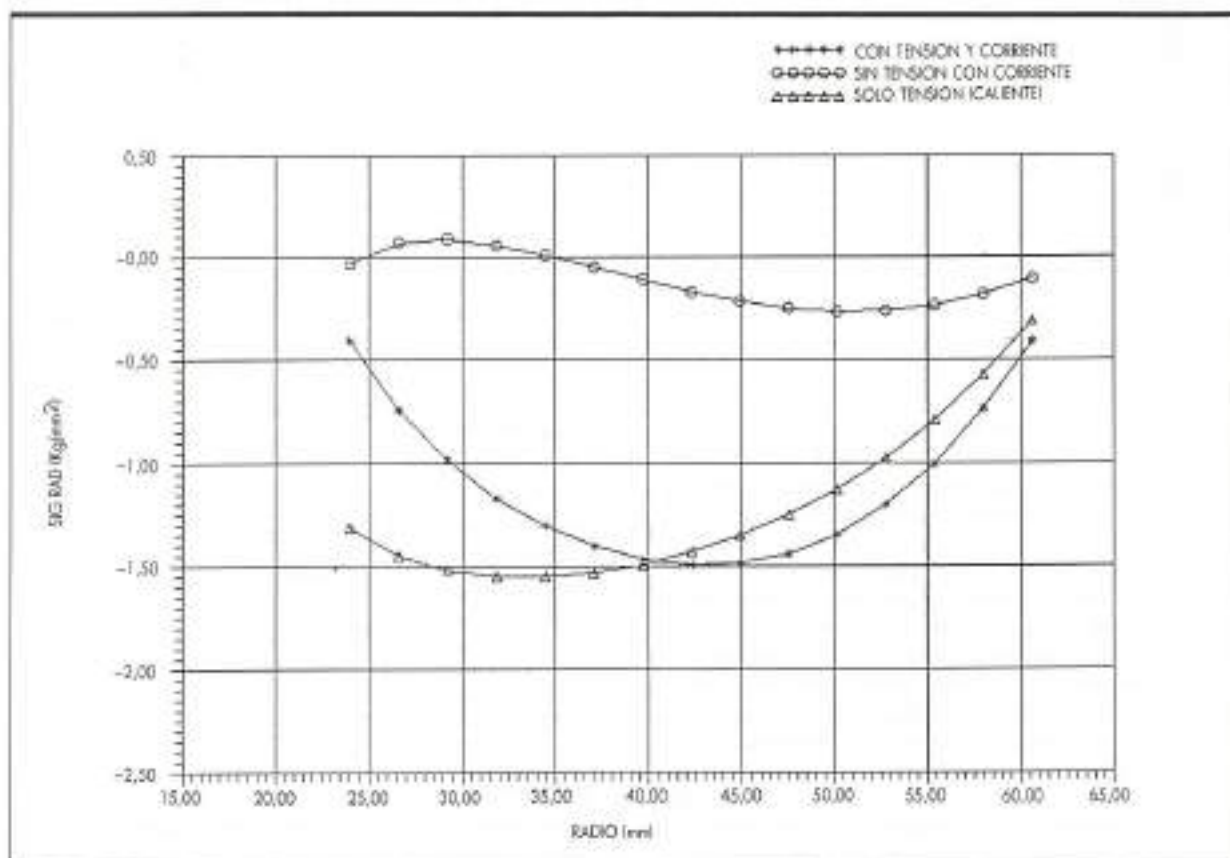


FIGURA 7. Distribución de esfuerzos radiales en el conductor.

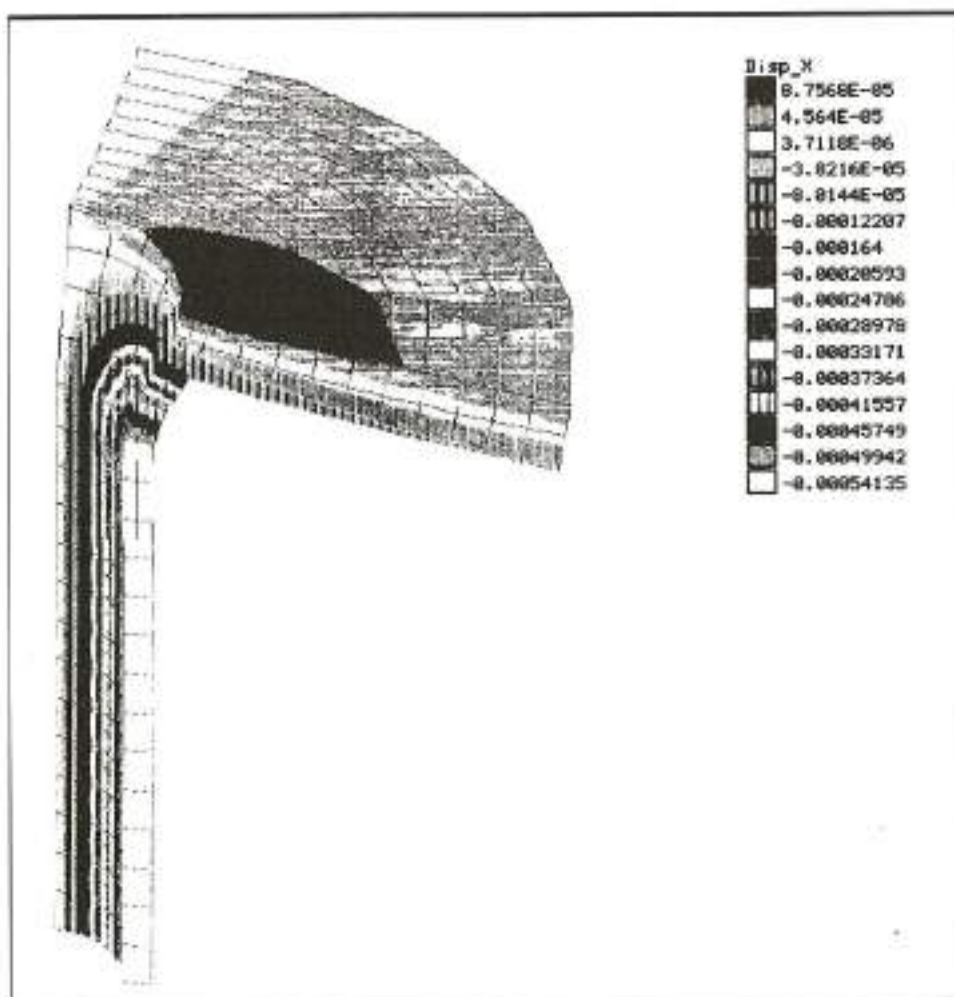


FIGURA 8. Deformaciones en el carril. Cálculo por elementos finitos.

gón tiene en la facultad de Físicas de la Universidad de Zaragoza. Este departamento, con una amplia experiencia en sistemas criogénicos, preparó una instalación a tal efecto cuyo funcionamiento ha sido extraordinariamente satisfactorio.

La figura 9 es una fotografía de la bobina antes de su colocación en el criostato de pruebas, mientras que la figura 10 son los resultados del «entrenamiento» de nuestra bobina comparados con los de una bobina convencional clásica. Como puede verse el comportamiento de nuestra bobina fue muy satisfactorio, confirmando los cálculos y los modelos que se han desarrollado.

En un futuro muy próximo comenzarán las pruebas de la fuente de alimentación y del sistema de almacenamiento de energía y si los resultados son satisfactorios como es de esperar, se planteará la fase de diseño y construcción de un almacenador a escala industrial para su uso por las compañías eléctricas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el constante apoyo que han tenido y siguen teniendo de diversas personas y organismos, muy especialmente de M. A. Rodríguez Borra, del consorcio de empresas ACICA, por su estímulo y dedicación; a F. Ynduráin, gestor del programa MIDAS, por su apoyo y confianza; a los técnicos de las empresas AME y ABENGOA, por su paciencia y esfuerzo y, cómo no, a nuestros compañeros del CEDEX, que desde la dirección o los laboratorios han ayudado enormemente al buen final del proyecto.

REFERENCIAS

1. WILSON, M. N. Superconducting Magnets. Clarendon Press, Oxford, 1986.
2. BRECHNA, H. Superconducting Magnet Systems. Springer-Verlag, Berlin, 1973.



FIGURA 9. Aspecto general de la bobina.

3. MONTGOMERY, D. B. *Solenoid Magnet Design*. Robert, E. Krieger Publishing. Malabar, Florida.
4. *Materials at Low Temperature*. Edited by P. Reud and F. Clark. American Society for Metals, 1983.
5. PERIN, R.; SIEGEL, N.; BIDAURAZAGA, H., GARCIA-TABARES, L. Design and Fabrication of the Prototype Superconducting Tuning Quadrupole and Octupole Correction Winding for the LHC Project. 12th Magnet Technology Conference. Leningrado, 1991.
6. BOENING, H. J.; HAUER, J. F. Commissioning Test of the Bonneville Power Administration 30MJ Superconducting Magnetic Storage Unit. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-104, Feb., 1985.

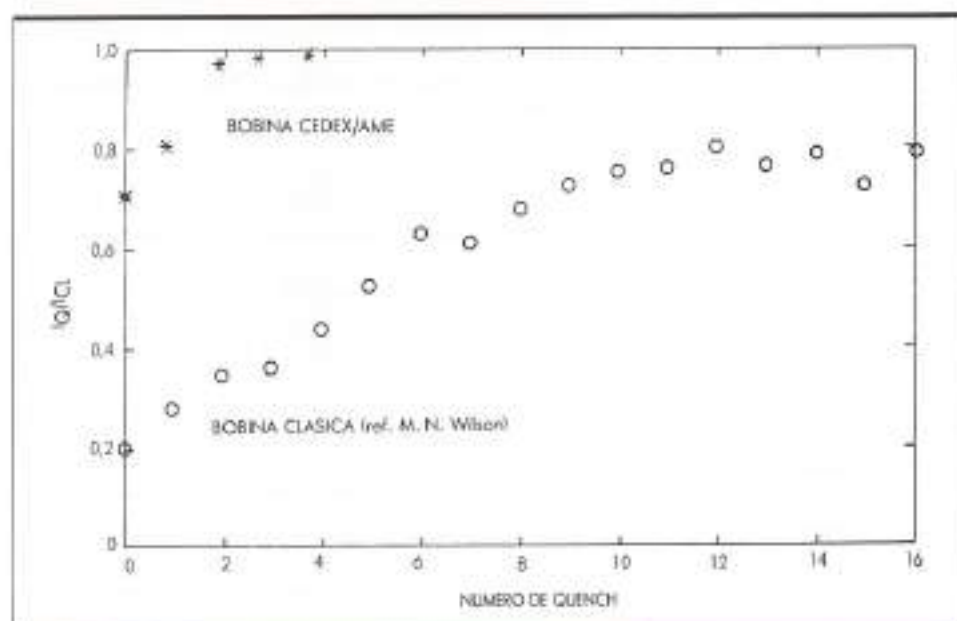


FIGURA 10. «Entrenamiento» del imán.