

Análisis de las propiedades dinámicas de los imanes superconductores del acelerador de partículas "LHC"

JOSÉ MARÍA ASANZA ASANZA (*); JORGE IGNACIO IGLESIAS DÍAZ (**)

RESUMEN Este artículo presenta la simulación de las cadenas de imanes superconductores del LHC ("Large Hadron Collider"), realizada mediante un convenio de colaboración entre el CEDEX y el CERN. En él se describe como, en base a las medidas en frecuencia de los prototipos de los principales imanes del LHC, se elaboraron unos modelos eléctricos que constituyen los elementos básicos para la determinación de las impedancias totales de dichas cadenas (incluidos los espectros de resonancia) y para el análisis de la necesidad de un amortiguamiento adicional. Además, se han realizado los cálculos de rizados y los estudios sobre su puesta en marcha (arranque), siendo especialmente tratados los fenómenos transitorios que se producen en la actuación de la protección ante 'quench' y la consiguiente operación de disipación de la energía acumulada en los imanes.

ANALYSIS OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF THE LARGE HADRON COLLIDER (LHC) SUPERCONDUCTING MAGNETS

ABSTRACT The present paper describes the computer aided simulation of superconducting magnet chains for the LHC collider, made through an Agreement of Collaboration between CEDEX and CERN. Based on measurements of A.C. electrical characteristics of magnets prototype, synthesised computer models of the principal superconducting magnetic elements of the Large Hadron Collider has been elaborated. These models constitute the basic elements for the determination of the impedance of the magnet chains (including the resonance spectrum) and the analysis of additional damping. Also, data from ripple calculations and ramping studies are discussed; the transient phenomena occurring in the dipole chains during operation of the quench protection and the fast extraction of the stored magnetic energy are especially important.

Palabras clave: LHC; Imanes Superconductores; Dipolos; Cuadripolos; Simulación.

1. INTRODUCCIÓN

En Agosto de 1995, el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Fomento) firmó un Convenio con el CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas) titulado: "Computer Aided Simulation of Magnet Chains for the LHC Collider". En este convenio, el Sector de Técnicas Físicas y Electrónicas del Centro de Técnicas Aplicadas desarrollaría la simulación de la cadena de imanes superconductores que formarán parte del futuro acelerador LHC (Large Hadron Collider).

Para llevar a cabo estas tareas, el CEDEX desplazó a D. José María Asanza a las instalaciones del CERN en Ginebra, que ha trabajado en la División LHC-ICP en estrecha colaboración con D. Knud Dahlerup-Petersen, ingeniero del CERN. El resultado de dicho trabajo se resume en el presente artículo.

2. LOS IMANES DEL LHC

El LHC, como colisionador de hadrones, aprovechará la obra civil del actual acelerador en servicio, el LEP, que, con su tú-

nel de 27 km de perímetro, constituye el mayor acelerador de partículas del mundo.

Este nuevo acelerador producirá colisiones protón-protón de 14 TeV de energía y una luminosidad de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. También podrá proporcionar colisiones de iones pesados (de plomo) con una energía superior a 1000 TeV y una luminosidad que excederá de $10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

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

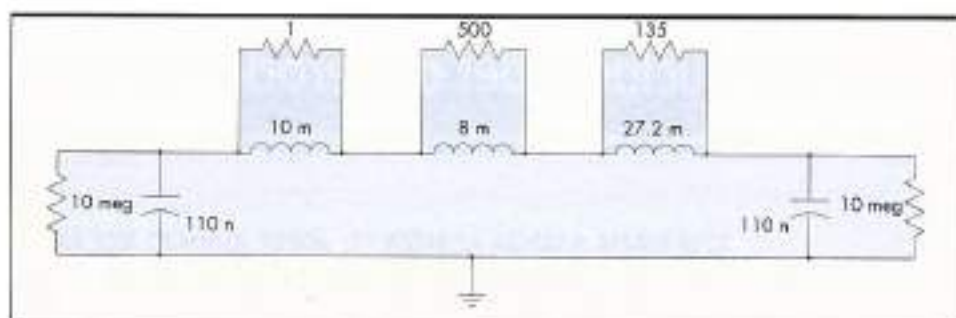
Para el desarrollo de un proyecto como el LHC es necesario comprobar todas y cada una de sus partes con gran rigurosidad. Esto es especialmente importante para los principales imanes superconductores, dipolos y cuadripolos, los cuales están al límite de lo que tecnológicamente puede ser construido hoy.

Al día de hoy, en un punto tan inicial de desarrollo del proyecto LHC (no se prevé su finalización antes de 8 años),

(*) Ingeniero Industrial. UPM Madrid.

(**) Dr. Ingeniero Naval. UPM Madrid. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Sector de Técnicas Físicas y Electrónicas. CEDEX. Ministerio de Fomento.

FIGURA 1. Modelo eléctrico del dipolo superconductor Ansaldo II de 10 metros del LHC.



la "simulación" es el único método para obtener información sobre el comportamiento dinámico de las cadenas de imanes. Conocer de forma precisa sus propiedades eléctricas y, para propósitos operacionales, saber sus frecuencias de resonancia son unas de las cuestiones más importantes.

Problemas más sutiles, como los relativos a la modulación en bajas frecuencias (producida por el rizado de la fuente de potencia), o al análisis de la apertura de la cadena de imanes en presencia de campos fuertemente no lineales, deben ser estudiados. La posible necesidad, y consecuencias, de incorporar un amortiguamiento en cada imán y su proceso de elección; localización de la puesta a tierra; realización y operación de los sistemas de extracción rápida de energía son otros puntos importantes que necesitan solución antes de tener disponible un octante completo de imanes superconductores.

Afortunadamente, los potentes simuladores hoy disponibles permiten el manejo de circuitos eléctricos equivalentes que contienen miles de componentes. En este estudio se utilizó el simulador analógico SABER®. Los datos presentados son relativos a la cadena de dipolos de un octante del LHC, que contiene 212 Dipolos de primera generación (Ansaldo III de 10 metros), y a los primeros modelos obtenidos para el cuadrípolo.

3. MODELO ELÉCTRICO DEL DIPOLO

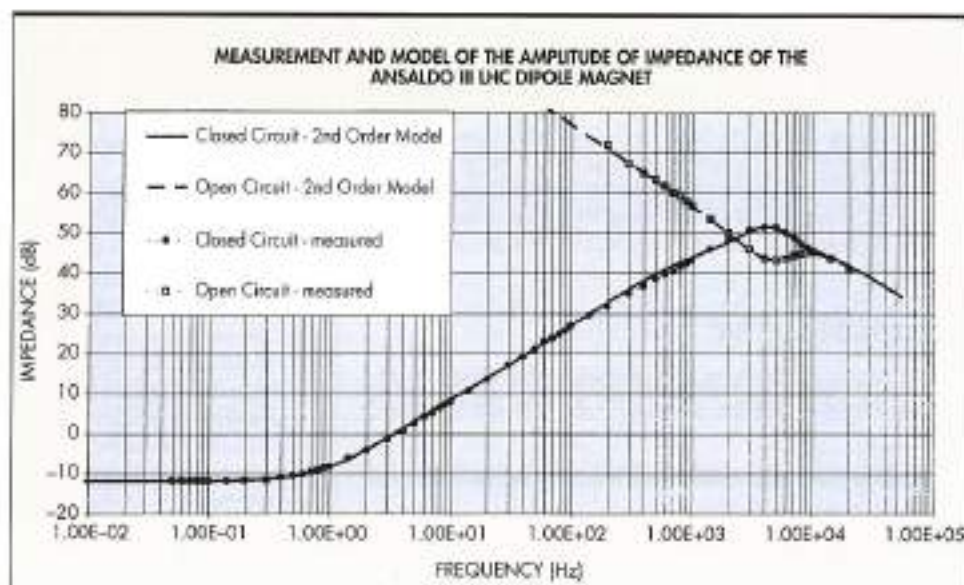
Para la medición de las características eléctricas dependientes de la frecuencia se utilizó un analizador de impedancias

combinada con un generador de frecuencia. Las medidas engloban: un análisis en frecuencia de la impedancia compleja, tanto con circuito cerrado como abierto, una medida a baja frecuencia de la inductancia total y, finalmente, otra de la capacidad a tierra del imán.

Siguiendo los desarrollos teóricos de las referencias 1, 2 y 3 se confeccionó un modelo eléctrico (figura 1) y se ajustó a los datos medidos experimentalmente, que se obtuvieron como se describe en la referencia 4. La inductancia total, teniendo en cuenta la medición realizada a muy baja frecuencia (a 10 mHz y 1,8 K: 45 mH), se dividió en tres partes para tener en cuenta el efecto de las corrientes de Foucault (Eddy currents). La capacidad a tierra (260 nF a 1,8 K) fue dividida en dos componentes idénticas, ubicadas en cada extremo del circuito del modelo.

Para mejorar el ajuste obtenido con el modelo de primer orden es necesario utilizar un modelo de segundo orden (figura 2); por encima de los 5 kHz el de primer orden se empieza a desviar y las mediciones indican que hay un máximo secundario que requiere el uso de otro de mayor orden. Sin embargo, para el modelado de la cadena completa de dipolos (212) es suficiente el primer modelo. En este caso la primera frecuencia de resonancia se da a unos 12-13 Hz; el octante completo tiene un espectro de resonancias inaceptablemente altas. Un amortiguamiento adicional (una resistencia en paralelo con la inductancia de unos 20 Ω) reducirá estas resonancias apreciablemente sin causar demasiados problemas

FIGURA 2. Amplitud de la impedancia del dipolo.



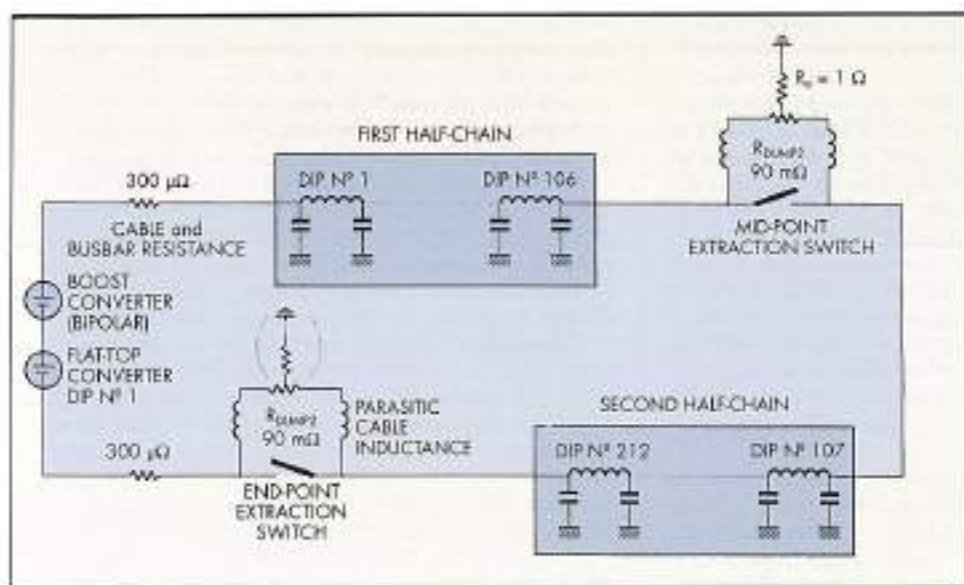


FIGURA 3. Circuito utilizado en las simulaciones de la cadena de dipolos.

respecto a la precisión de seguimiento o al sobrecalentamiento de la resistencia.

4. ANÁLISIS DEL RIZADO (CADENA DE DIPOLOS)

El circuito utilizado para los estudios de rizado se puede ver en la figura 3 y sitúa la tierra en el centro o final de la cadena de dipolos (en la que cada imán está representado con el modelo sintetizado).

Se consideraron sistemáticamente cuatro configuraciones principales en cada uno de los estudios: masa en el punto

medio de la resistencia de drenaje de quench del centro o del final de la cadena de dipolos y, para ambos casos, con sólo el amortiguamiento natural intrínseco a cada dipolo o con una resistencia adicional de 20 Ω/dipolo, añadida entre los terminales de cada imán.

El punto de partida para cualquier cálculo de rizado es la impedancia de toda la cadena de dipolos con el circuito cerrado (figura 4). El espectro de impedancias se desplaza en frecuencia con la tierra situada en el centro de la cadena ("mid-point earthing"), así, las frecuencias de resonancia son el doble de las que aparecen en el caso en que la tierra se si-

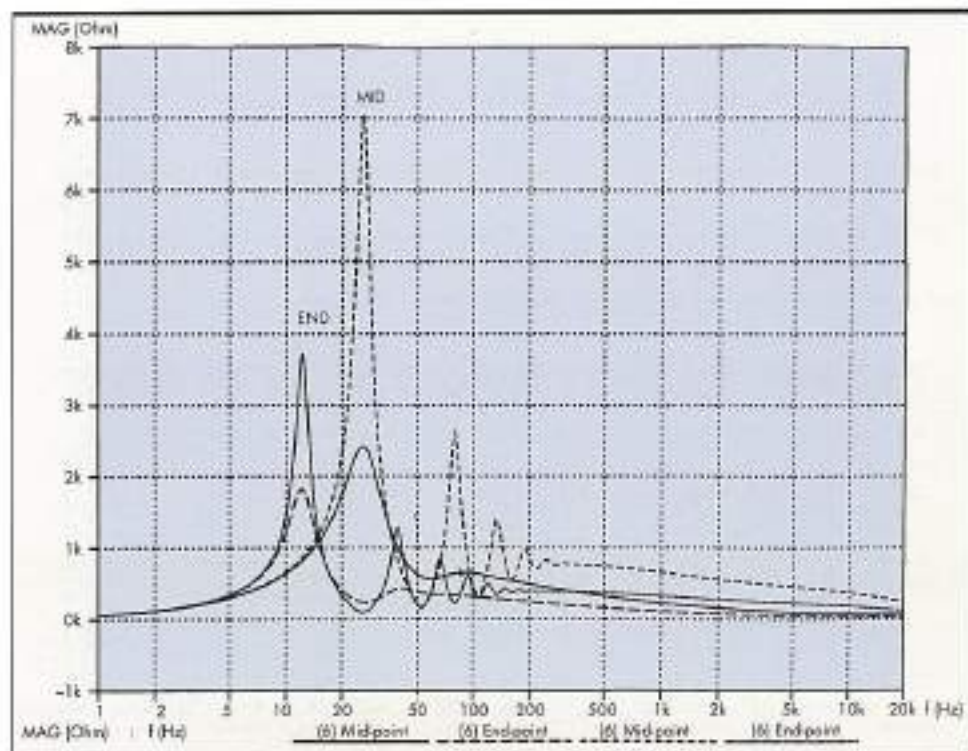


FIGURA 4. Impedancia total de la cadena de dipolos en función de la frecuencia.

túa en el final ("end-point earthing"). La atenuación cuando se conecta una resistencia de amortiguamiento adicional de 20 Ω es más importante en el caso con "mid-point earthing".

La relación entre la frecuencia y el rizado total de corriente del convertidor en función del rizado de la tensión de salida (figura 5) depende fuertemente de la localización de la tierra y del amortiguamiento adicional. La reducción significativa del rizado total en el caso con "mid-point earthing" es un primer resultado, confirmando la atenuación de los picos de corriente en la región de resonancia con el incremento de la amortiguación (resistencia de 20 Ω). Para frecuencias por encima de los 200 Hz, sin embargo, el rizado de corriente se eleva con el incremento de esta resistencia de amortiguamiento. Esto no está relacionado con un mayor rizado de corriente en los imanes, está ligado a un incremento de la corriente a través de la resistencia de amortiguamiento.

Un valor típico del rizado de corriente es aquel que se da a los 600 Hz, frecuencia fundamental en un sistema de potencia de 12 pulsos. En el mejor caso, "mid-point earthing" con amortiguamiento, este valor es de 0,03 ppm (partes por millón) para 100 mVpp de rizado en el convertidor de alimentación.

5. ESTUDIO DEL ARRANQUE ("RAMPING") EN LA CADENA DE DIPOLOS

Uno de los aspectos más importantes del estudio realizado consistió en el análisis de las distintas 'rampas de arranque' posibles y la propagación de estas tensiones a lo largo de toda la cadena de dipolos; haciéndose especial hincapié en el análisis de las diferencias instantáneas de corriente entre cada dipolo.

La tensión requerida para una variación de 10 A/s (≈ 121 V), fue aplicada, en primer lugar, como un 'escalón'. El re-

trazo hasta que el escalón alcanza un dipolo dado en la cadena (en forma atenuada) es independiente de la magnitud de la tensión de entrada, pero depende del punto de puesta a tierra: de 6 ms para "mid-point earthing" y 2 x 6 ms para "end-point earthing". La frecuencia de la oscilación de tensión a través de la cadena es la mitad en el último caso.

Las oscilaciones que aparecen al elevarse la corriente a lo largo del octante, características para una línea de transmisión, se muestran en la figura 6. La corriente se irá propagando por la cadena, siendo reflejada al mismo tiempo ("quedándose atrás"), hasta la completa atenuación de la oscilación. La periodicidad resulta ser de unos 9 ms.

Definiendo el 'error' de corriente como la diferencia existente entre la corriente en un imán dado y la del primer imán de la cadena, la relación entre el 'error' y la amplitud del escalón de tensión es lineal. Este error depende del amortiguamiento y la localización de la puesta a tierra. Los errores típicos máximos son: 1) 'Midpoint earthing': 18 ppm y 11 ppm (con amortiguamiento adicional) y 2) 'Endpoint earthing': 37 ppm y 23 ppm (con amortiguamiento adicional).

Los resultados anteriores resultaron ser inaceptablemente altos. Para obviar esto se simuló de nuevo reemplazando el escalón por una 'rampa' ($\Delta U = 121$ V durante 5 s). Ahora, la elevación de corriente se produce de forma parabólica y libre de oscilaciones. Y, además, se comprueba que de esta manera los 'errores' de corriente son drásticamente reducidos, comparados con el caso anterior (escalón), ya que su origen es diferente, sólo debidos a las corrientes que se desvían a tierra (capacitivas y resistivas). Están compuestos de un 'escalón' capacitivo proporcional a dU/dt , el cual es constante durante la rampa de voltaje y que desaparece al final de la misma, y una contribución resistiva, que se incrementa de manera proporcional al voltaje aplicado. La máxima diferencia en corriente durante la rampa es: En el caso con "mid-point earthing": 1,4 mA o 0,1 ppm y para "end-

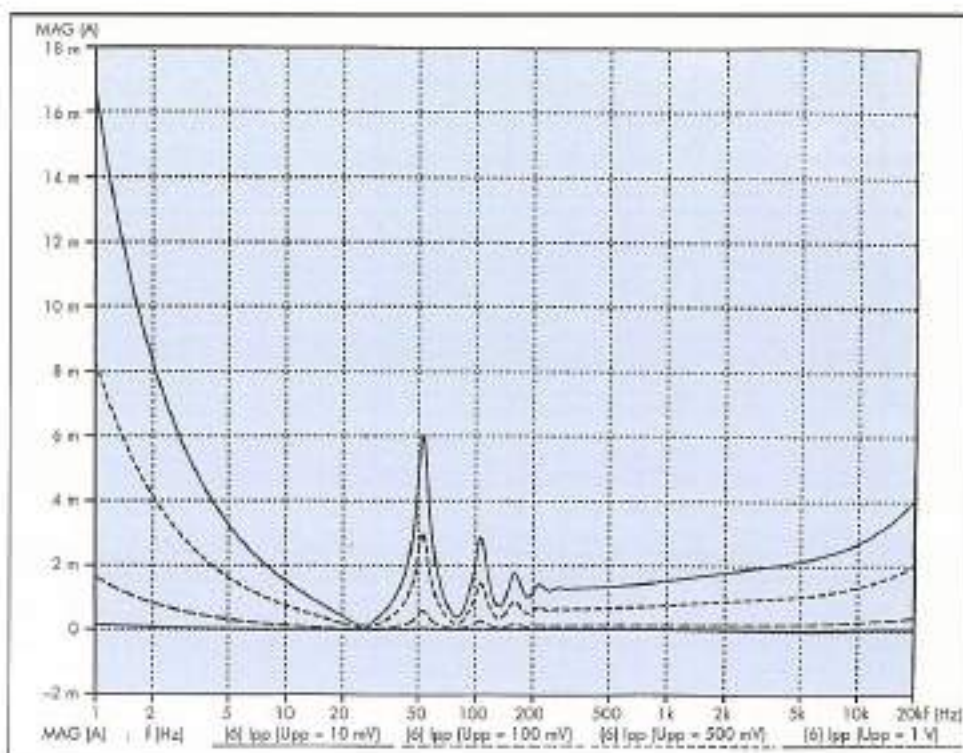


FIGURA 5. Rizado de corriente en la cadena de dipolos frente a la frecuencia.

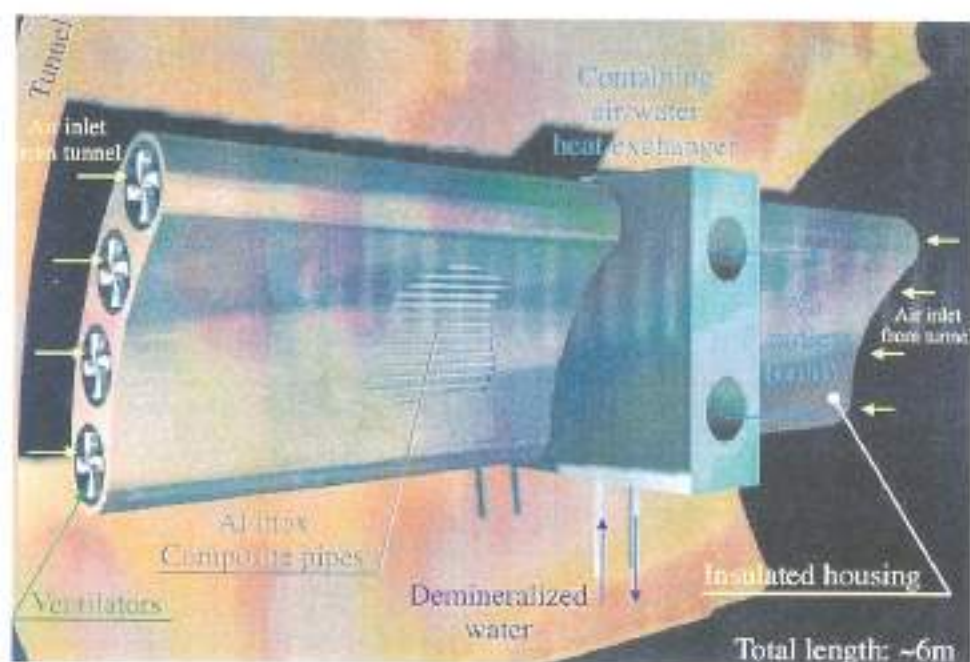


FIGURA 7. Aspecto de la resistencia de "quench" una vez instalada en el túnel del LHC.

sucesos: 1) apagado del convertidor de potencia y 2) apertura de los "switches". La corriente total a masa es la suma de la contribución capacitiva y la resistiva de estos eventos.

Gracias a la simetría, las corrientes a tierra resultantes de la apertura de los interruptores de quench, se compensan en cada media-cadena. Esta característica es válida tanto para corrientes capacitivas y resistivas como para localización de la tierra en el punto medio o final. Consecuentemente, la corriente a masa a través de la resistencia a tierra de 1Ω , causada por la apertura de los "switches", es, de esta forma, constantemente cero.

Por el contrario, las corrientes a tierra que se producen con el apagado repentino de la fuente de alimentación únicamente se cancelan en el caso de "mid-point earthing".

En el caso de que, por funcionamiento anormal, solamente se abriese el interruptor situado en el punto medio, la tensión máxima respecto de masa no se incrementa en comparación con el caso de operación correcta. Sin embargo, la forma de onda de la oscilación varía (se doblan la longitud de onda y el retraso (de 5 ms al final de la cadena)) y es necesario un mayor tiempo para la atenuación de la oscilación. Evidentemente, la energía disipada en la resistencia de drenaje asociada al "switch" que abre se dobla con respecto al funcionamiento normal. Ello constituye un riesgo de sobrecalentamiento si al dimensionar no se ha tenido en cuenta este caso.

El siguiente paso de las simulaciones requería la elaboración de un modelo más realista de la resistencia de "drenaje" o de "quench". Para ello se usó un "template" escrito en MAST (lenguaje de programación de Saber®). Esta subrutina calcula la variación temporal de la temperatura de la resistencia y el valor actual de la misma en un depósito adiabático para cada paso de integración en la rutina principal.

En la realidad, los tubos resistivos son montados en una matriz paralela encapsulada en el interior de un recinto aislado, que contiene un intercambiador de aire y agua. Aire a temperatura ambiente se introduce a través de sus extremos y fluye a lo largo de los tubos calientes hacia el centro,

donde se localiza el intercambiador. El aire frío es entonces devuelto al túnel y reconducido de vuelta en un circuito cerrado a las entradas del sistema. En caso de un fallo en el sistema de potencia, la resistencia permanece caliente y el agua fría hasta el restablecimiento de la bomba y los ventiladores. El aislamiento asegurará una mínima transferencia de calor al aire del túnel. En la figura 7 se puede ver la resistencia de "quench" instalada en el túnel.

En el inicio del estudio se tomó un híbrido de aluminio y acero para los tubos y, así, aprovechar la excelente relación capacidad calorífica-coste del Aluminio.

El incremento del valor de la resistencia de drenaje modificará constantemente la constante de tiempo de descarga. Comparando con el caso completamente exponencial, la resistencia inicial más baja dará un menor dI/dt al inicio de la descarga. La corriente total descendiendo como se ve en la figura 8, donde se compara al caso de $R(t) = 90 \text{ m}\Omega$.

Los valores que configuran la resistencia (valor resistivo inicial y masas) se eligieron para no superar los valores de tensiones obtenidos en el caso de $90 \text{ m}\Omega$ (obteniéndose finalmente un valor máximo de tensión de 450 V). Las oscilaciones de tensión en la línea de transmisión desaparecen a los 100 ms de la apertura de los interruptores, pudiéndose comprobar como la variación de la resistencia de quench no afecta a estas. La resistencia se estabiliza en un valor de unos $146 \text{ m}\Omega$ ($2 \times 73 \text{ m}\Omega$) después de aproximadamente 100 s . El valor medio de la temperatura de la resistencia se establece en unos 396° C , después de unos 100 s desde la apertura.

Se puede observar cómo, con la presente configuración, el aluminio alcanza su punto de fusión cuando uno de los dos interruptores permanece cerrado. Sin embargo, esto podría no tener consecuencias para la resistencia si se toman algunas precauciones en la fabricación (por ejemplo, el encapsulado en vacío del aluminio).

Durante la desexcitación (aperturas) las corrientes pasan a través del diodo de protección de "quench" del imán. Las pérdidas en este diodo son proporcionales a la corriente que circula a través de él (se puede considerar como una fuente de tensión). Para limitar estas pérdidas la resistencia de

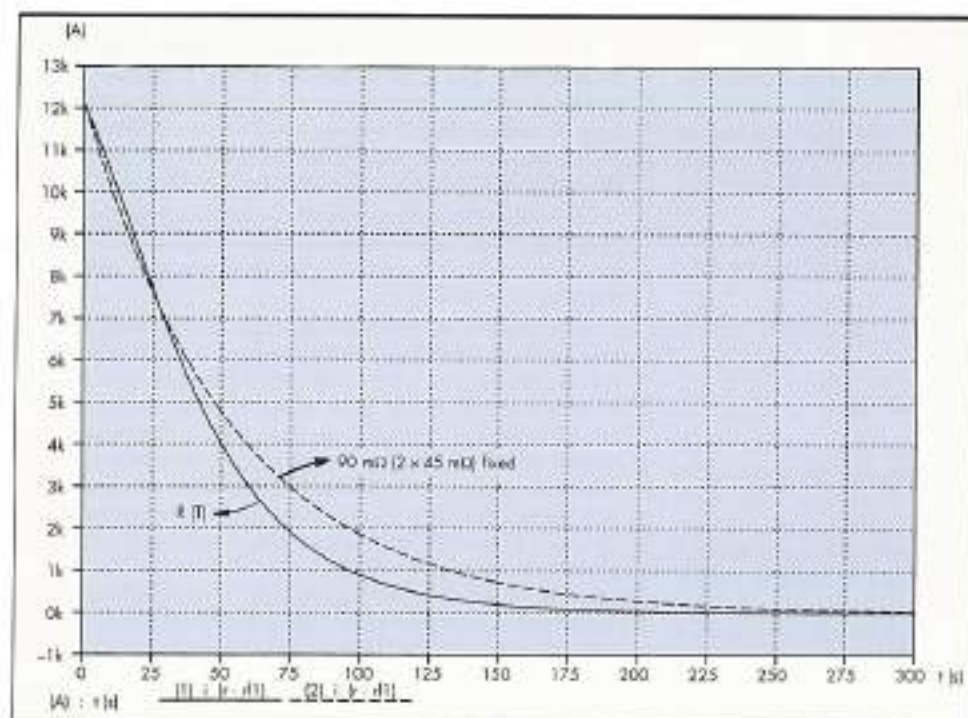


FIGURA 8. Corriente de descarga al actuar la protección de "quench" (comparativa resistencia cte. y var.).

drenado de quench debería de producir un rápido descenso de la corriente para una tensión máxima dada. Una resistencia constante da una caída exponencial de corriente (y tensión) que no es, obviamente, óptima. Claramente, el óptimo es una tensión constante que produzca un descenso lineal de la corriente. Ello implicaría una resistencia que se incrementara linealmente con el descenso de la corriente. Sin embargo, esto resulta del todo imposible, ya que la relación entre el incremento de temperatura en la resistencia y el incremento de su valor resistivo es proporcional al cuadrado de la corriente. Sin embargo, se puede encontrar un compromiso, con un descenso inicial más o menos lineal, con una combinación apropiada de elementos, como se muestra en párrafos anteriores.

En el caso anterior teníamos la resistencia dividida en dos partes de unos 60 mΩ, una por cada uno de los "switches". Sin embargo, en realidad, se va a disponer de ocho elementos, conectados en paralelo cuatro y cuatro y luego en serie estos dos bloques, (esta configuración es necesaria debido a las intensidades y tensiones que deben soportar los "switches" y diodos).

Con este circuito se han hecho numerosas pruebas, una de ellas consta de un híbrido de aluminio y acero estriado, similar al utilizado anteriormente. Ahora, la resistencia inicial de la que se parte a temperatura ambiente será de unos 70 mΩ. Los resultados obtenidos, comparados con el caso anterior, son muy similares: ligero incremento de las tensiones máximas con la consiguiente mejora en la rapidez del descenso de la corriente y una temperatura que ronda los 300° C.

A continuación se pasa a una resistencia con sólo acero estriado (idéntico al utilizado anteriormente), resultando una resistencia de 71 mΩ a temperatura ambiente. La tensión resultante es mayor (se incrementa en 50V) y el descenso de corriente mejora, aunque no en exceso. Se puede comprobar como se alcanzan unas tensiones mayores a cambio de tener descensos mayores de corriente. La tempera-

tura en la resistencia no supera los 325° C. Esta solución sería, según los datos de materiales del CERN, casi el doble de económica que la anterior.

Para terminar, se simuló un caso similar al anterior salvo que se utilizaba acero estriado con un valor de resistividad mayor (antes $\alpha = 12,1 \cdot 10^{-4}$ y ahora $\alpha = 30 \cdot 10^{-4}$). Con ello se pretendía que las tensiones no superaran el valor de los 450 V y se mantuviera la caída de corriente. Los resultados no fueron todo lo satisfactorios que se podría desear.

7. CONCLUSIONES SOBRE LA CADENA DE DIPOLOS

Para la elaboración de un modelo del dipolo del LHC se necesitan medidas en frecuencia de la impedancia tanto en circuito abierto como cerrado. Para un único imán se ajusta mejor un segundo orden del modelo, mientras que para toda la cadena es suficiente con usar el modelo de primer orden.

La cadena de dipolos principal del LHC tiene resonancias a bajas frecuencias (alrededor de los 13 Hz). Con resistencias de amortiguamiento adicionales es posible atenuarlas satisfactoriamente.

El rizado de corriente total e individual está por debajo de una parte por millón para puntos de resonancia y con fuentes de alimentación con rizados relativamente elevados.

La aplicación de tensión en rampa para el arranque es necesaria. Si se aplica un escalón se crearán importantes diferencias de corriente a lo largo de la cadena.

La situación de la toma de tierra es de la mayor importancia. La forma tradicional de hacerlo, en uno de los terminales de la fuente de alimentación puede producir importantes daños en algunos de los imanes de la cadena. La simulación desarrollada ha determinado que la elección óptima es la localización de la masa en el punto medio de la resistencia central de "quench".

La apertura de los "switches" de protección ante quench no produce sobretensiones pero sí oscilaciones violentas (en

particular, en los imanes del 20 a 40 desde cada extremo de media-cadena). Un amortiguamiento de al menos 50Ω por dipolo atenuará estas oscilaciones, por lo que se recomienda su uso.

Tanto las corrientes capacitivas como resistivas que se desvían a tierra se cancelan dentro de cada media-cadena para una configuración con la masa situada en el punto medio de la cadena.

La no apertura de uno de los interruptores de protección ante quench no producirá daños por sobretensión a los imanes de la cadena.

La simulación permite la optimización del sistema de disipación de energía.

8. MODELO ELÉCTRICO DEL CUADRIPOLO

Al igual que se obtuvo un modelo eléctrico para poder simular el comportamiento del dipolo (imán superconductor principal del LHC), basado en aquellos utilizados para las líneas eléctricas de alta tensión, se quería lograr uno para el cuadrupolo. De esta forma, los estudios realizados con el simulador analógico SABER® para el primero se podrían repetir para el segundo.

El problema radicaba en que mientras para el dipolo se había dispuesto de medidas directas sobre el prototipo, en el caso del cuadrupolo, las únicas medidas que se podían utilizar eran las que se lograrán sobre una cadena formada por un cuadrupolo y tres dipolos conectados en serie. Ello era debido a que la cadena de ensayo actualmente instalada en el CERN (con estos cuatro imanes superconductores) no podría ser desmontada hasta un año después y no había posibilidad de cambiarla.

Con un equipo y circuito similar al utilizado para las medidas experimentales del dipolo se realizaron mediciones sobre la impedancia total de la cadena tanto en punto flotante (negativo de la fuente conectado al final de la cadena y sin ningún punto a masa) como con el negativo del generador a tierra (para circuito cerrado y abierto).

Aprovechando la posibilidad de acceder a los terminales de cada uno de los imanes superconductores que forman parte de la cadena también se pudieron obtener relaciones

entre la diferencia de tensión en los bornes de cada imán (dipolos y cuadrupolo) y la intensidad que entraba en el total de la cadena. Los gráficos que así se van a obtener no responden a ninguna impedancia propiamente dicha, pero a la hora de simular, en el circuito que se crea en Saber, se podrán obtener las mismas relaciones que las que aquí se están consiguiendo con el analizador de impedancias.

De esta manera, al comparar el grado de similitud entre cada pareja de curvas (experimentales y simuladas) se verá hasta que punto los modelos obtenidos son adecuados y se ajustan a la realidad.

No obstante, se presentan diversas dificultades. En primer lugar, el modelo que se tiene para los dipolos fue deducido en base a los resultados experimentales obtenidos a partir del primer dipolo de la actual cadena. Luego, para los otros dos dipolos, el modelo no tiene porque ajustarse con la misma exactitud y podría no ser válido (sobre todo en lo referente a capacidades a tierra, es decir, corrientes que en los imanes se desvían a masa). Pero también existe otro problema, si cabe, más importante: los errores existentes en el modelo de cada dipolo (apreciables al comparar las curvas experimentales con las resultantes de la simulación), podrían superar los valores correspondientes al propio cuadrupolo, siendo imposible obtener un modelo adecuado.

Conociendo las limitaciones existentes, se continuó el trabajo y se obtuvieron dos modelos distintos (uno, obtenido a partir de una cadena en la que no varía ninguno de los tres modelos utilizados para los dipolos y, otro, cambiando ligeramente la capacidad a tierra del tercero). No hay un muy buen ajuste entre lo simulado y lo medido, lo que hace pensar que los modelos no son lo suficientemente exactos, pero, a pesar de todo, en base a ellos, se simuló el circuito completo de cuadrupolos que irá montado en el LHC (dos por octante, dieciséis en total, de 23 cuadrupolos cada uno), pues la exactitud del modelo se ve compensada por el efecto del conjunto y gracias a ello se piensa que la impedancia total que se obtiene es orientativa (interesa conocer, sobre todo, las frecuencias de resonancia).

En la figura 9 se pueden ver el módulo de las impedancias obtenidas con circuito abierto y cerrado para los dos mo-

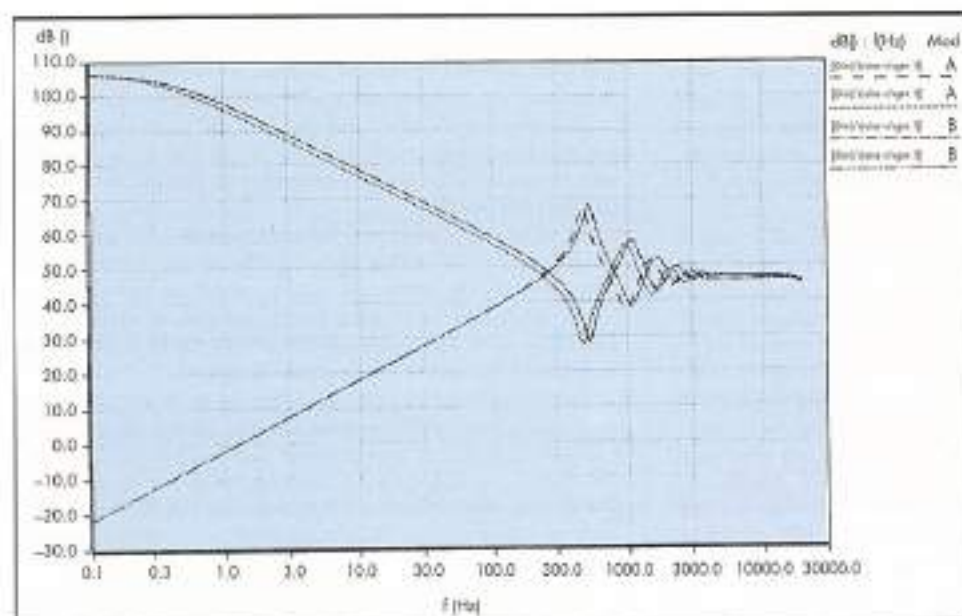


FIGURA 9. Amplitud de la impedancia de la cadena de cuadrupolos (circuito abierto y cerrado).

delos de cuadrupolo (A y B). Resulta interesante comprobar como la primera frecuencia de resonancia está alrededor de los 400 Hz, mucho mayor que para la cadena de dipolos (era de 12-13 Hz), lo que nos indica que la alimentación de los cuadrupolos será menos problemática que la de los dipolos.

9. CONCLUSIONES DEL MODELO DEL CUADRIPOLO

Para la correcta elaboración de un modelo del cuadrupolo del LHC es necesario hacer medidas en frecuencia del imán aislado, tanto en circuito abierto como cerrado.

Si se dispone de medidas sobre una cadena de imanes montada, la obtención de la parte inductiva del modelo resulta posible, pero la parte capacitiva y las frecuencias de resonancia pueden no ser correctas.

La cadena de cuadrupolos tiene resonancias a valores mucho más elevados que la cadena de dipolos. La primera aparece alrededor de los 400 Hz frente a los 12-13 Hz de la de dipolos. De este resultado se concluye que podrían no ser necesarias resistencias de amortiguamiento adicional, si bien este punto debe ser confirmado una vez se hayan realizado mediciones sobre el imán aislado.

10. CONCLUSIONES GENERALES

Se ha desarrollado una simulación mediante Saber® de la cadena de dipolos y cuadrupolos del LHC. Como resultado de

la misma se ha obtenido información de gran importancia en lo referente a los siguientes puntos:

- Se han dimensionado las resistencias de 'quench' en la cadena de dipolos.
- Se ha determinado el punto óptimo de la puesta a tierra de dicha cadena.
- Se han fijado los rizados que se deberían especificar en la fabricación de las fuentes de alimentación.
- Se han validado los modelos de los dipolos.
- La simulación completa de la cadena de cuadrupolos se deberá llevar a cabo una vez se obtengan por parte del CERN resultados experimentales de un cuadrupolo aislado.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Shafer, Fermilab, TM-991, 1620.000, (1980).
- [2] R. Bacher y alumnos, DESY HERA 90-16, (1990).
- [3] P. Burla y alumnos, AIP Conference Proceedings 326, (1994).
- [4] K. Dahlerup-Petersen y F. Schmidt, LHC Project Note 11.

ENTREGA DEL PREMIO SIKI 1997

Se ha celebrado la entrega del Premio SIKI, en su 3ª convocatoria, destinado a los alumnos del último curso de las Escuelas de Caminos de España.

El premio trataba sobre el recrecido de una presa con objeto de aumentar su capacidad.

Los datos que permiten determinar las características que debían reunir el hormigón, así como las peculiaridades del recrecido se obtenían a través de una conversación informal mantenida entre dos ingenieros a punto de iniciar los trabajos del proyecto. En el concurso se proponía el diseño de los hormigones en cuanto a aditivo, sistemas de protección ante el agua, así como de procedimiento de fijación entre los elementos de la obra nueva con la vieja.

El Jurado estaba presidido por Don Vicente Sánchez Galvés y compuesto por Don Manuel Alonso Franco, Don Javier Asencio Marchante, Don Enrique Bofill de la Cierva, Don Ricardo Domínguez Bautista, Don José Luis Elvira Muñoz, Don Manuel Fernández Cánovas, Don Ángel González Lucas, Don Enrique González Valle, Don José Luis Juan Aracil, Don Manuel Martín Antón, Don Santiago Pérez Fadón, Don Enrique Pérez Galdós, Don Edelmiro Rúa Álvarez, Don Pedro Suárez Boreas y Don José A. Torroja Cabanillas; actuando como secretario Don Fernando Perdiguer.

Los premios entregados en presencia del Presidente de SIKI Don Luis Vázquez Ares correspondieron a:

- 1.º Premio dotado con 400.000 pesetas al equipo compuesto por Don Fernando Alonso González, Don

Luis Calderón Nágera, Don Rodrigo Llorente Cachorro y Don Francisco Pérez Nieto.

- 5 accesits dotados con 100.000 pesetas al equipo compuesto por Don Diego J. Díaz Piñero y Don David López Rivas, Don Ángel Luis Pasamontes, Don Miguel Vera García, Don Juan Marcos Martín González y Don José María Navas Durán.

La entrega de Premios se celebró en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, en un acto en el que se valoró y puso de manifiesto el interés por la colaboración entre las Empresas y la Universidad.



Alumnos galardonados con el Primer Premio

El mundo entero construye sobre Polyfelt

Geotextiles Agujados de *Filamento Continuo*



Construcción de carreteras



Terraplenes



Vías férreas



Túneles



Zanjas de drenaje



Drenaje de taludes



Canales



Vertederos



Refuerzo de taludes



Barreras antiruido

reconocidos expertos en Geosintéticos

Polyfelt Geosynthetics Iberia, S.L.
c/ Azaleas, 1, Edificio E - 2.º
Miniparc 1 - El Soto de la Moraleja
28109 Alcobendas (Madrid)
Telfs.: (91) 650 63 18 - 650 64 61
Fax: (91) 650 98 28

polyfelt®
Polyfelt Gruppe