

Criterios de estabilidad y metodología de diseño de un solenoide superconductor de 6 Tesla

JOAN-CARLES CASAS SANCHÍS (*)

RESUMEN Entre los principales elementos de diseño de toda aplicación de potencia de los superconductores se encuentra la estabilidad, es decir, la capacidad de mantener el estado de superconductividad para todas las condiciones de funcionamiento posibles. En el presente artículo se realiza una breve exposición de dos criterios de estabilidad: el de estabilidad criogénica y el de estabilidad dinámica. El primero es aplicable a elementos superconductores inmersos en un fluido refrigerante y se fundamenta en igualar en todo momento a lo largo de una perturbación la potencia de generación de calor con la potencia de refrigeración. El segundo criterio es aplicable tanto a elementos superconductores no refrigerados (caso adiabático) como elementos inmersos en un fluido refrigerante (caso no adiabático) y se basa en que la cantidad total de energía calorífica generada a lo largo de una perturbación debe ser menor o igual que la energía evacuada al medio circundante más la energía absorbida por el conjunto superconductor-estabilizador.

Para ilustrar la aplicación de los distintos criterios, se presenta el diseño de un solenoide de 6 Tesla en base al criterio de estabilidad dinámica adiabática y los resultados son comparados con los obtenidos siguiendo los demás criterios expuestos. Se comprueba que el criterio de estabilidad criogénica es más conservador que el de estabilidad dinámica, pues mediante el primero se obtiene una bobina cuyo coste es 3.3 veces superior al diseño según el segundo.

STABILITY CRITERIA AND DESIGN METHODOLOGY OF A 6 TESLA SUPERCONDUCTOR SOLENOID

ABSTRACT Amongst the principal design elements of any power application of superconductors is that of stability, that is, the ability to maintain the superconductive state for all the possible operating conditions. In this article a brief exposition is given of two stability criteria—that of the cryogenic stability and that of the dynamic stability. The first is applicable to superconductor elements immersed in a coolant and is based, at all times during a disturbance, on matching the power of heat generation to the power of refrigeration. The second criterion is applicable both to non refrigerated superconductor elements (adiabatic case) and to elements immersed in a coolant (non-adiabatic case) and is based on the fact that the total amount of calorific energy generated throughout a disturbance should be less than or equal to the energy discharged in the surrounding medium plus the energy absorbed by the superconductor-stabilizer.

In order to illustrate the application of the different criteria, the design of a 6 Tesla solenoid is shown, in keeping with the criterion of adiabatic dynamic stability, and the results are compared with those obtained by following the other criteria outlined. It is demonstrated that the criterion of cryogenic stability is more conservative than that of dynamic stability, for the cost of the coil resulting from the application of the first is 3.3 times that resulting from the application of the second.

Palabras clave: Superconductividad; Solenoide; Estabilidad; Criogenia; Estabilidad dinámica; Gradiente térmico.

NOMENCLATURA

a = radio de la sección transversal de un hilo superconductor.
 A = sección transversal.
 B_c = densidad de flujo magnético en el centro del solenoide.
 C = Calor específico del conductor.
 h = coeficiente de transmisión de calor.
 i = fracción de corriente.
 I_t = corriente de transporte.
 I_c = corriente crítica.
 J_c = densidad de corriente crítica.

k = conductividad térmica.
 l = longitud de perturbación.
 $2L$ = longitud del solenoide.
 P = perímetro mojado.
 R_i = radio interior del solenoide.
 R_e = radio exterior del solenoide.
 S = parámetro de Stekly.
 $\alpha = R_e/R_i$
 $\beta = L/I_t$
 β_c = parámetro de estabilidad criogénica.
 β_d = parámetro de estabilidad dinámica.
 γ = densidad del conductor.
 δ = función de τ .
 ε = función de i .
 λ = fracción de superconductor.

(*) PhD en Ingeniería Nuclear y Física de Ingeniería por la Universidad de Wisconsin-Madison.

- v = parámetro de refrigeración criogénica.
 ρ = resistividad.
 θ_c = temperatura crítica del material.
 θ_0 = temperatura del fluido refrigerante.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

Desde hace ya muchos años, cuando fue descubierta por el científico británico Kammerlingh Onnes en 1911, la superconductividad ha sido un fenómeno físico que ha centrado la atención de numerosas personas, tanto por su interés científico como por las grandes oportunidades que ofrece desde un punto de vista de aplicaciones tecnológicas.

No obstante, no fue sino a mediados de los años 60, con el descubrimiento de los llamados superconductores de tipo II, que empezaron a desarrollarse un buen número de aplicaciones relacionadas principalmente con la generación de campos magnéticos de alta intensidad. Posteriormente, el descubrimiento en 1986 de los llamados superconductores de alta temperatura significó un renovado interés por la superconductividad por cuanto abría la posibilidad de desarrollar aplicaciones refrigeradas por nitrógeno líquido, mucho más asequible económicamente que el helio líquido necesario en las aplicaciones hasta la fecha con superconductores de baja temperatura.

Los elevados valores de corriente que puede circular por los superconductores así como la nula disipación de energía por efecto Joule, hace que estos materiales estén principalmente indicados en aquellas aplicaciones en que se requiera generar campos magnéticos muy intensos o bien en aplicaciones de transporte y almacenamiento de energía eléctrica. Entre las primeras pueden destacarse la construcción de imanes para investigación, aceleradores de partículas, reactores de fusión, levitación de trenes de alta velocidad, resonancia magnética nuclear y separación de metales. Entre las segundas pueden destacarse las líneas de transporte de energía eléctrica y los sistemas SMES (superconducting magnetic energy storage).

Varias de las aplicaciones anteriormente citadas requieren la construcción de imanes en forma de solenoide, por lo que resulta muy interesante el estudio de las particularidades propias de dicha geometría.

Entre las bases de diseño de todo imán superconductor de potencia debe contemplarse su grado de *estabilidad*, es decir, su capacidad de permanecer en el estado superconductor a pesar de posibles perturbaciones en las condiciones de operación nominales. Existen distintos criterios de diseño que permiten elegir el grado de estabilidad con que se quiere dotar al imán. Según el criterio de estabilidad que se elija se obtendrán diseños con características muy distintas. En general, puede decirse que un imán muy estable corresponderá a un diseño conservador y, en general, de elevado coste.

El objeto del presente artículo es precisamente ilustrar la influencia del criterio de estabilidad escogido en el diseño final de un imán superconductor.

Para ello, se plantea el diseño de un solenoide superconductor de 6 Tesla y se indica en líneas generales cual es la metodología a seguir, desde la elección del hilo superconductor más adecuado hasta la determinación de las dimensiones de la bobina. Ello se realiza en función de distintos criterios de estabilidad y se comparan los resultados finales.

Para ilustrar el proceso de diseño del solenoide en cuestión se ha tomado como material superconductor el NbTi refrigerado con helio líquido, puesto que éste es hasta la fecha el material más comúnmente utilizado en este tipo de apli-

caciones y del que se conocen mejor sus características. Sin embargo, la metodología que se expone y las conclusiones que se derivan del presente artículo son de tipo general y por lo tanto, podrían trasladarse también al caso de superconductores de alta temperatura.

Debe señalarse que en el presente artículo se han omitido algunos detalles de diseño de tipo constructivo, con el fin de no desviar la atención del objetivo principal. Para mayor detalle acerca de la construcción de un solenoide superconductor, el lector es referido a [1, 2].

2. ALGUNAS CONSIDERACIONES BÁSICAS

2.1. PROPIEDADES MACROSCÓPICAS DE LOS SUPERCONDUCTORES

La superconductividad es el fenómeno mediante el cual ciertos materiales, al ser enfriados a temperaturas muy bajas, exhiben dos propiedades muy específicas:

1. Pérdida de toda resistencia al paso de la corriente eléctrica.
2. Expulsión de su interior de todo campo magnético externo (efecto Meissner).

Dicho fenómeno viene caracterizado, desde un punto de vista macroscópico, por tres parámetros fundamentales:

- Temperatura crítica (θ_c). Es aquella por debajo de la cual el material pasa al estado de superconductividad.
- Campo magnético crítico (H_c). Cuando un material en estado superconductor es sometido a un campo magnético de intensidad superior a H_c , éste pasa al estado de conducción normal (resistiva).
- Densidad de corriente crítica (J_c). Cuando la densidad de corriente que circula por el superconductor excede el valor J_c , éste pasa al estado de conducción resistiva.

Estas tres magnitudes características no son independientes entre sí, sino que están relacionadas a través de la llamada superficie crítica del superconductor (ver Figura 1).

En particular, la dependencia entre el campo crítico y la temperatura viene dada por:

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_c} \right)^2 \right] \quad [1]$$

donde H_0 es el campo magnético crítico a 0° K.

Por otro lado, J_c disminuye con la temperatura de forma aproximadamente lineal, según la expresión

$$J_c = J_0 \frac{\theta_c - \theta}{\theta_c - \theta_0} \quad [2]$$

Dado que J_c es siempre decreciente con la temperatura, un superconductor operando exactamente en el valor de J_c se convierte en resistivo debido incluso a pequeños incrementos de la temperatura. Es por ello que debe preverse un margen de seguridad y operar el superconductor a un valor $J_c < J_c$.

2.2. ESTABILIDAD DE BOBINAS SUPERCONDUCTORAS

El principal problema que debe resolverse en toda aplicación de potencia de los superconductores es el asegurar que se mantenga el estado de superconductividad para todas las condiciones de funcionamiento posibles (*estabilidad del estado superconductor*). Para ilustrar el problema de la estabilidad, consideremos el caso de una bobina superconductora por cuyo devanado circula una densidad de corriente J_c y en

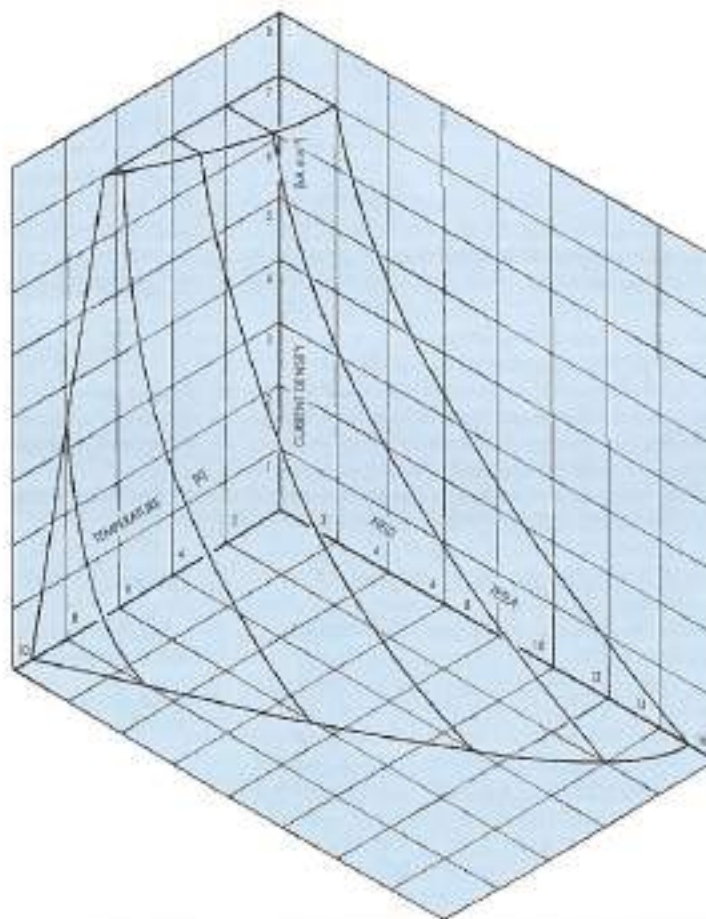


FIGURA 1. Superficie de corriente crítica para una típica aleación comercial de NbTi [4].

el que se produce una deposición puntual de energía (por ejemplo, por la fricción debida a un movimiento entre dos espiras). Si la temperatura local del hilo superconductor alcanza el valor de la temperatura crítica del material, éste pasa al estado resistivo, con la consecuente generación óhmica de calor. En situación de equilibrio, el balance entre el calor conducido por los extremos de la zona normal y el calor generado viene dado por:

$$\frac{2kA(\theta_c - \theta_o)}{l} = J_c^2 \rho A l \quad [3]$$

donde

- k = conductividad térmica del hilo superconductor.
- A = sección transversal.
- l = longitud de la perturbación.
- ρ = resistividad del hilo en estado normal.

Reordenando términos se tiene que

$$l_{npe} = \left(\frac{2kA(\theta_c - \theta_o)}{J_c^2 \rho} \right)^{1/2} \quad [4]$$

La anterior longitud l_{npe} es la denominada longitud de la zona de propagación mínima y es una propiedad del material superconductor. En aquellos casos en que una perturbación ocasione una zona normal cuya amplitud sea superior a l_{npe} , ésta tenderá a propagarse a todo el hilo puesto que la tasa de generación de calor será superior a la de evacuación

del mismo por conducción en los extremos. Por consiguiente, conviene utilizar materiales con un valor elevado de l_{npe} . Ello se consigue normalmente a base de aumentar la conductividad térmica y disminuir la resistividad.

A tal fin, es necesaria la utilización de hilos compuestos (ver Figura 2) en los que los filamentos superconductores se hallan inmersos en una matriz de material de elevada k y baja ρ , como Al o Cu.

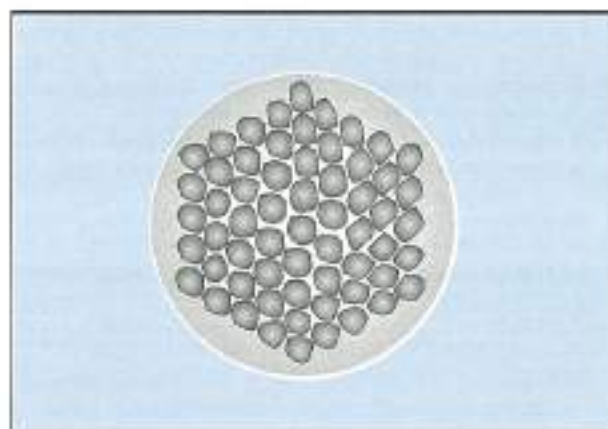


FIGURA 2. Sección transversal de un hilo superconductor multifilamentar.

3. CRITERIOS DE ESTABILIDAD

Existen distintos criterios de estabilización de imanes, según el tipo de perturbaciones frente a la cuales se quiera proteger el imán y el grado de seguridad que se desee establecer.

Se entiende en general por estabilización de superconductores a todas aquellas acciones orientadas a evitar que la aparición de una pequeña zona normal en un punto de una bobina superconductora ocasione la extensión de ésta a la totalidad de la bobina (quench).

3.1. ESTABILIZACIÓN CRIOGENICA

Según se ha visto, es posible que una zona normal desaparezca si el enfriamiento por conducción es superior a la potencia calorífica generada. En general, esto solo ocurre para el caso de zonas normales pequeñas, del orden de los pocos milímetros.

Con el fin de aumentar la estabilidad de los superconductores, es posible recurrir a la estabilización criogénica, que consiste en emplear un fluido a muy baja temperatura (en general He líquido) para la refrigeración por convección (natural o forzada) del material.

A partir de un sencillo balance de energía para una muestra de un hilo superconductor compuesto, se tiene que para que exista estabilidad criogénica debe cumplirse que la potencia de refrigeración debe ser superior a la potencia de generación de calor, es decir:

$$\frac{\lambda^2 J_c^2 \rho A}{(1 - \lambda) P h (\theta_c - \theta_f)} = S \leq 1 \quad [5]$$

expresión conocida como el criterio de Stekly, donde

λ = fracción (tanto por uno) en volumen de material superconductor respecto a material total (superconductor, estabilizador y aislante).

P = perímetro mojado.

h = coeficiente de transmisión de calor.

θ_c = temperatura del fluido refrigerante.

S = parámetro de Stekly.

En el proceso de derivación de la expresión 5 se ha supuesto que la transferencia de calor al fluido aumenta de forma lineal con la diferencia de temperaturas entre la muestra y el fluido, es decir, que el coeficiente de transmisión de calor h es una constante.

La Figura 3 muestra de forma simplificada la curva típica de transferencia de calor de una superficie metálica inmersa en un baño de helio líquido a 4.2° K. En ella, en la zona OPQ se produce la llamada ebullición nucleada, caracterizada por una elevada transferencia de calor puesto que en ella aún existe líquido en contacto con la superficie. Conforme aumenta el flujo de calor, se pasa a la zona QR (la zona QR es inestable y normalmente no observable) de ebullición pelicular, caracterizada por la aparición de una

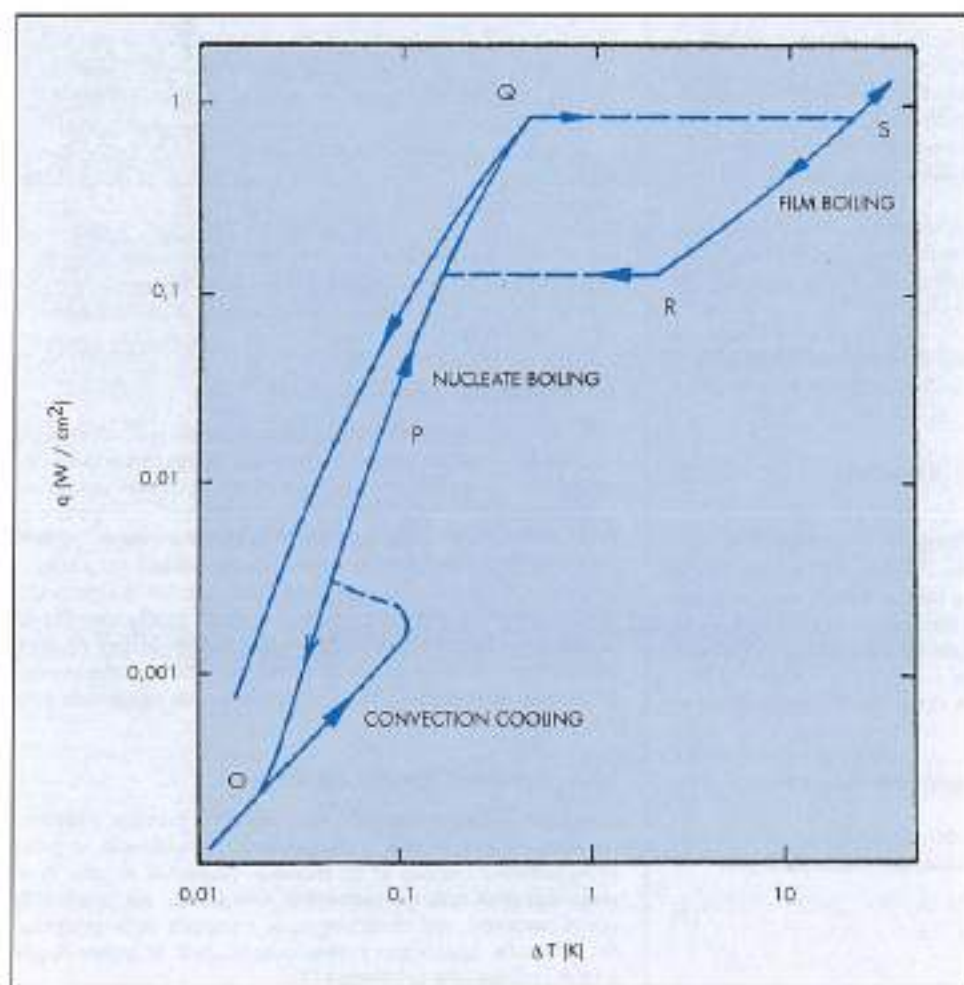
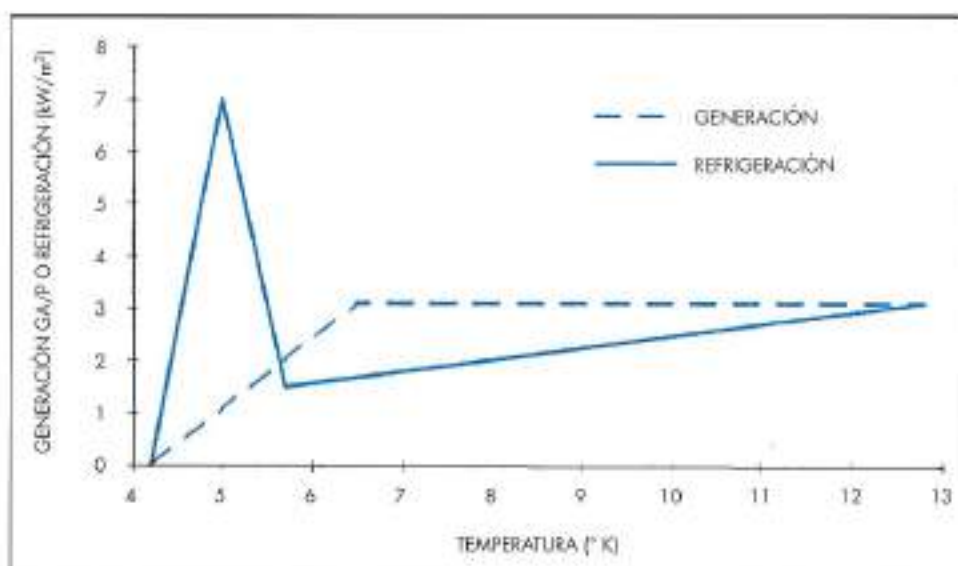


FIGURA 3. Curva típica de transferencia de calor desde una superficie metálica inmersa en un baño de helio líquido a 4.2° K.

FIGURA 4. Representación gráfica del teorema de las áreas iguales, para NbTi a 6 T ($R_c = 6,5$ K)



película de vapor que dificulta la evacuación de calor. Esta zona presenta pues unos coeficientes de transferencia de calor mucho menores que los de la zona de ebullición nucleada.

Una medida muy conservadora en la utilización del criterio de Stekly consiste en utilizar valores de h típicos de la zona de ebullición pelicular ($240 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$). En este caso, dicho criterio constituye una condición necesaria y suficiente para mantener la estabilidad. Sin embargo, es posible obtener valores más elevados de densidad de corriente considerando que la refrigeración se producirá en la zona de ebullición nucleada. En este caso, el coeficiente de transferencia de calor depende de la duración del pulso de calor, oscilando entre los $50.000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ para pulsos menores de 0.01 s y $9.000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ en régimen permanente. Debe remarcarse el hecho de que para poder utilizar estos elevados valores de h , es preciso asegurar que el régimen de ebullición nucleada se mantiene a lo largo de toda la perturbación.

Si además de considerar el enfriamiento por convección se tiene en cuenta la transmisión de calor por conducción a través de los extremos, se llega a la expresión conocida como el teorema de las áreas iguales

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} \left(H(\theta) - \frac{A}{P} G(\theta) \right) h(\theta) d\theta = 0 \quad [6]$$

donde $H(\theta)$ y $G(\theta)$ son las funciones que expresan el enfriamiento y la generación de calor (W/cm^2) en función de la temperatura y θ , la temperatura máxima en la zona normal.

La Figura 4 muestra la interpretación geométrica de la anterior expresión suponiendo que la conductividad térmica es constante con la temperatura. Para que se cumpla la condición 6, el área neta encerrada entre las curvas de generación y refrigeración debe ser cero, lo que equivale a decir que un exceso de generación a altas temperaturas es permisible si va unido a un exceso de refrigeración de igual cuantía en la zona de bajas temperaturas.

A partir de la igualdad 6 se obtiene un límite para la máxima generación de calor permitida, que viene dado por:

$$G_c \frac{A}{P} = \frac{\lambda^2 J_c^2 \rho}{1 - \lambda} \frac{A}{P} \leq \quad [7]$$

3100 W/m^2 .

Es sabido que la transmisión de calor por ebullición es muy sensible al estado de la interfase sólido-líquido. Se ha comprobado [3] que finos recubrimientos aislantes pueden de hecho mejorar la transferencia de calor a helio líquido en ebullición. Si bien se produce una disminución del coeficiente de transferencia de calor en ebullición nucleada, ésta va acompañada de un notable aumento del flujo de calor mínimo en ebullición pelicular, lo que significa que el valor de la generación crítica $G_c A/P$ que satisface el teorema de las áreas iguales aumenta de 3100 a 4800 W/m^2 .

El criterio de estabilidad criogénica es aceptable, por lo general, en la construcción de imanes de gran tamaño, donde la exigencia de una alta fiabilidad es más importante que los criterios de coste. Sin embargo, resulta ser un criterio demasiado conservador, imponiendo una baja densidad de corriente global y por tanto el empleo de mayor cantidad de materiales, con lo que dicho criterio no suele ser utilizado en la construcción de pequeños imanes.

3.2. ESTABILIDAD DINÁMICA

El criterio de estabilidad criogénica proviene de un análisis en régimen estacionario y se basa en imponer en todo momento a lo largo del proceso de desarrollo de una perturbación que la potencia de refrigeración es superior o igual a la potencia de generación de calor. Un criterio menos estricto de estabilidad resulta de realizar un análisis dinámico e imponer que la energía total en forma de calor disipada durante una perturbación es menor o igual que la energía en forma de calor evacuado más calor absorbido por el compuesto superconductor-estabilizador (estabilidad dinámica). Dentro de ésta, cabe distinguir entre el caso adiabático y no adiabático.

3.2.1. Estabilidad dinámica adiabática

Un criterio conservador de estabilidad dinámica proviene de suponer que el hilo superconductor compuesto se halla térmicamente aislado de su entorno. Entonces, el calor disipado durante una perturbación sólo puede ser absorbido por el material, con el consecuente aumento de la temperatura de éste. Igualando ambas magnitudes se puede llegar a la expresión (ver referencia [4])

$$\beta_i = \frac{\mu_0 \lambda^2 J_c^2 a^2}{\gamma C (\theta_c - \theta_a)} = \left(-\frac{1}{2} \ln \varepsilon - \frac{3}{8} + \frac{\varepsilon^2}{2} - \frac{\varepsilon^4}{8} \right)^{-1} \quad [8]$$

donde

β_i = parámetro de estabilidad.

a = radio de la sección transversal del hilo superconductor compuesto.

C = Calor específico del conductor.

γ = densidad del conductor.

$\varepsilon = (1 - i)^{1/2}$.

$i = I/I_c$.

I_c = Valor máxima permisible de la corriente de transporte.

I_c = corriente crítica.

La expresión 8 impone un límite superior al valor máximo de la corriente de transporte I_c , para que se garantice la recuperación del estado normal después de una perturbación. La Figura 5 muestra el valor de β_i en función de la corriente de transporte.

3.2.2. Estabilidad dinámica no adiabática

Si consideramos una muestra de hilo superconductor compuesto inmersa en un fluido criogénico, y suponemos que se produce una perturbación, el calor disipado se convierte en calor absorbido por el superconductor más calor evacuado al medio refrigerante. En tal caso, la condición para tener estabilidad dinámica viene dada por (ver referencia [4])

$$\beta_i = \frac{\mu_0 \lambda^2 J_c^2 a^2}{\gamma C (\theta_c - \theta_a)} = \left(\frac{1 + \frac{2v}{\delta^2}}{-\frac{1}{2} \ln \varepsilon - \frac{3}{8} + \frac{\varepsilon^2}{2} - \frac{\varepsilon^4}{8}} \right) \quad [9]$$

donde

$$v = \frac{h a \mu_0 (1 - \lambda)}{\gamma C}$$

δ = función de ε , resultante de resolver la expresión

$$\frac{J_c(\delta \varepsilon)}{Y_0(\delta \varepsilon)} = \frac{J_c(\delta)}{Y_1(\delta)} \quad [10]$$

A partir de la expresión 9 se puede demostrar que la condición de estabilidad criogénica expresada en la ecuación 5 (criterio de Stekly) se puede escribir como $\beta_i = 2v/i$, expresión que para un cierto valor de v , resulta en un valor de $\beta_i < \beta_i$. De ahí se ve que el criterio de estabilidad criogénica es más conservador que el de estabilidad dinámica. A su vez, la expresión 9 es menos restrictiva que la 8. En la Figura 6 se muestra el valor de β_i y β_c en función de la corriente de transporte.

IDENT.	Ø FILAM. µm	Ø HILO mm	I_c (5 T) A	I_c (8 T) A	λ	COSTE UNIT. ^a
1 ^a	200.00	0.43	42.00	21.00	0.21	1.00
2 ^a	250.00	0.43	62.00	30.00	0.33	1.03
3 ^a	28.00	0.35	94.00	40.00	0.39	1.22
4 ^a	34.00	0.43	139.00	57.00	0.38	1.39
5 ^a	42.00	0.54	217.00	89.00	0.38	1.76
6 ^a	50.00	0.63	312.00	128.00	0.38	2.23
7 ^a	59.00	0.75	425.00	175.00	0.38	2.50
8 ^a	75.00	0.90	575.00	240.00	0.42	3.02

^a Referido al coste del hilo 1.

^b Monofilamentar.

^c Al filamento.

TABLA I. Relación de hilos superconductores considerados.

4. EJEMPLO DE DISEÑO DE UN SOLENOIDE SUPERCONDUCTOR

Para ilustrar la metodología a seguir y la utilización de las anteriores expresiones, se plantea el diseño de un solenoide con las siguientes características:

- Diámetro interior: $2R_i = 5$ cm.
- Campo magnético en el centro: $B_0 = 6$ T.
- Uniformidad del campo: La relación entre el campo máximo en la pared interior y el campo en el centro $B_{\theta} / B_0 \leq 1.02$.

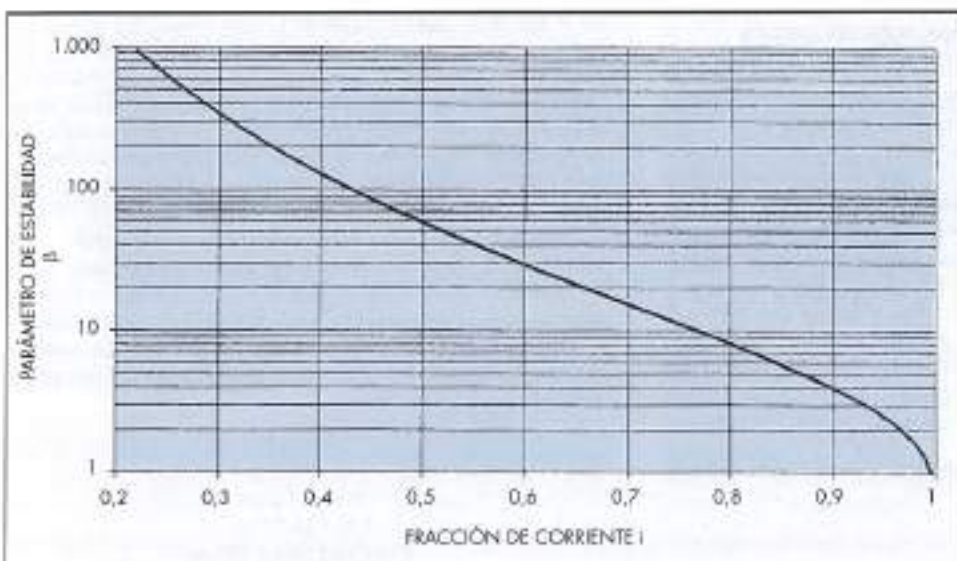
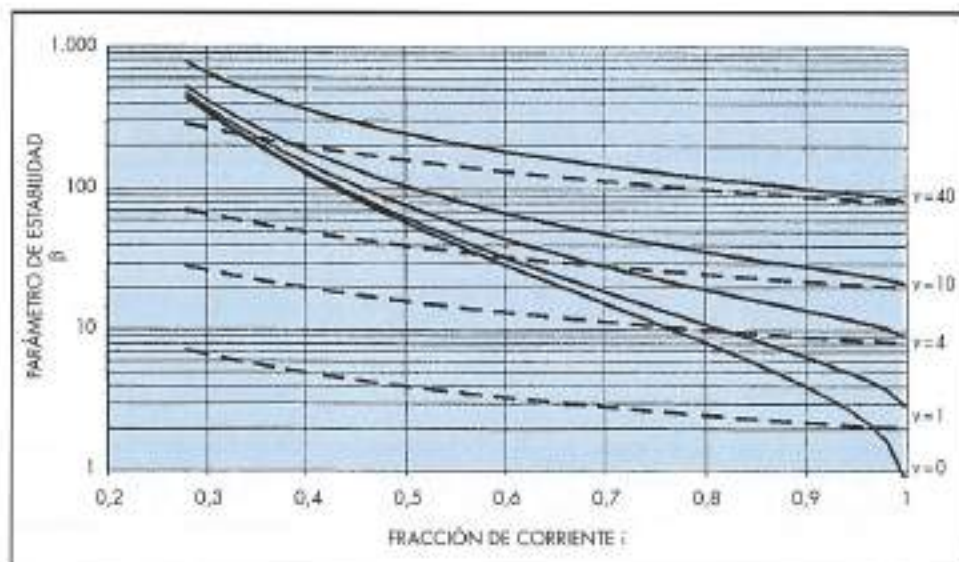


FIGURA 5. Parámetro de estabilidad dinámica β_i en función de la corriente de transporte para un conductor en condiciones adiabáticas [a partir de [4]].

FIGURA 6. Parámetro de estabilidad dinámica β , en función de la corriente de transporte en un conductor en condiciones no adiabáticas, para diversos valores del factor de transferencia de calor γ . Las líneas discontinuas muestran el parámetro de estabilidad criogénica β_c a partir de [4].



Para ello deberá seleccionarse el más adecuado de los hilos compuestos superconductores presentados en la tabla I. Todos ellos son hilos de NbTi en matriz de cobre disponibles comercialmente.

Ante todo debe señalarse que el diseño que se pretende indicar en el presente artículo no sería suficiente desde un punto de vista constructivo, sino que como ya se ha indicado, el objetivo es ilustrar el efecto de los distintos criterios de estabilidad en las dimensiones y coste final de la bobina.

Lo primero es determinar, para cada uno de los hilos considerados, el parámetro β_c , teniendo en cuenta que:

- El valor de J_c debe considerarse para el valor máximo posible del campo magnético, es decir $B_{c0} = 1,02 B_c = 6,12 \text{ T}$.
- El valor de γC para el compuesto se obtiene como media ponderada de los valores para el NbTi y el Cu, que para unas condiciones de $4,2^\circ \text{ K}$ y 6 T son $5,2 \cdot 10^3$ y $10^3 \text{ J / (m}^3 \cdot \text{K)}$ respectivamente.
- Para $B = 6 \text{ T}$, la temperatura crítica del NbTi es $\theta_c = 6,5^\circ \text{ K}$.

A partir de β_c es posible determinar el valor del ratio "i" mediante el empleo de alguno de los criterios de estabilidad anteriormente presentados.

4.1. CRITERIO DE ESTABILIDAD DINÁMICA ADIABÁTICA

Es práctica habitual en este tipo de imanes el realizar un impregnado del bobinado con resina epoxy para darle mayor rigidez y evitar posibles movimientos entre espiras. En tal caso, el hilo conductor no estaría expuesto directamente al baño de He líquido, por lo que lo adecuado en este caso sería utilizar el criterio de estabilidad dinámica adiabático. Utilizando pues la expresión 8, se obtienen los valores de "i", y en consecuencia queda determinada la corriente de transporte máxima I_t permitida por el hilo superconductor.

Una vez conocida I_t , puede determinarse el factor de forma del solenoide, $F(\alpha, \beta)$ necesario para conseguir el campo magnético deseado, a partir de la expresión:

$$B_0 = J_c R_i F(\alpha, \beta) \quad [11]$$

donde

B_0 = es la densidad de flujo magnético en el centro del solenoide.

R_i = es el radio interior.

$\alpha = R_o / R_i$

$$\beta = L / R_i$$

R_o = radio exterior de la bobina.

$2L$ = longitud de la bobina.

La densidad de corriente J que circula por el bobinado viene dada por:

$$J = J_c \lambda i f \quad [12]$$

donde f es el factor de llenado del bobinado cuyo valor es, suponiendo un hilo de diámetro d ,

$$f = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{\pi}{4} \quad [13]$$

Una vez hallado el factor de forma F es preciso encontrar los parámetros α y β a partir de la expresión

$$F(\alpha\beta) = \mu_0 \beta \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}} \quad [14]$$

expresión que ha sido representada en la Figura 7.

Como puede observarse en dicha figura, existen numerosas combinaciones de α y β que resultan en un mismo valor de F . Un determinado valor de campo magnético puede conseguirse tanto con una bobina corta y gruesa como con una larga y estrecha. La diferencia estriba en la uniformidad del campo en el interior de la bobina, la cual aumenta al aumentar la longitud de la bobina, según se puede observar en la Figura 8. Puesto que se desea una uniformidad menor o igual al 2%, ello establece un valor mínimo para β , quedando consecuentemente definido el valor α .

Una vez hallados los valores de α y β se dispone de las dimensiones de la bobina, y en base al diámetro del hilo superconductor, se pueden determinar el número de capas y espiras necesarias y, consecuentemente, la longitud de hilo a emplear.

En la tabla II se puede ver que la bobina cuyo coste es menor sería la construida con el hilo número 8. Sus principales características son:

$$\begin{aligned} i &= 0,66 \\ I_t &= 297 \text{ A} \\ 2 R_o &= 7,9 \text{ cm} \\ 2 L &= 12,75 \text{ cm} \\ \text{Longitud hilo} &= 490 \text{ m} \end{aligned}$$

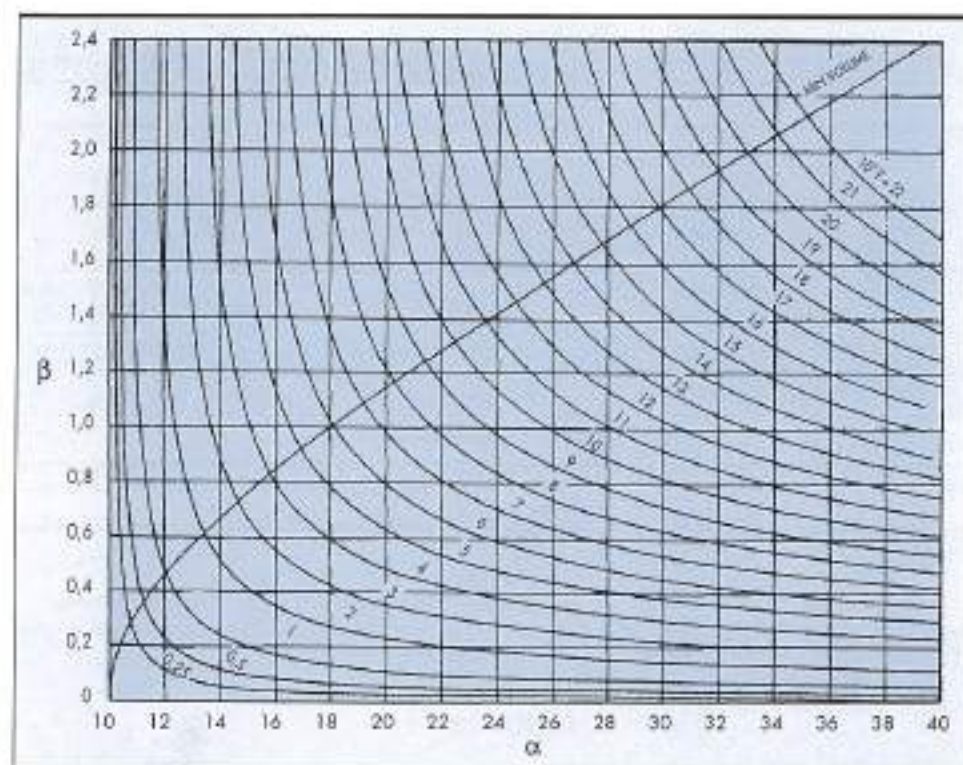


FIGURA 7. Factor de forma F en función de los parámetros adimensionales α y β [4].

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que para conseguir el campo magnético requerido sería preciso disponer de una fuente de alimentación capaz de suministrar 300 A. En caso de disponer solamente de una fuente de alimentación de 100 A, podría emplearse el hilo número 4, del cual se precisarían 1380 m e incrementaría el coste en un 30%.

4.2. CRITERIO DE ESTABILIDAD DINÁMICA NO ADIABÁTICA

Una forma de aumentar la estabilidad del solenoide sería tratar de permitir el contacto directo del He líquido con las vueltas del bobinado con el fin de aumentar la capacidad de evacuación de calor. Ello podría conseguirse, por ejemplo, en base a la realización de un impregnado de tipo poroso.

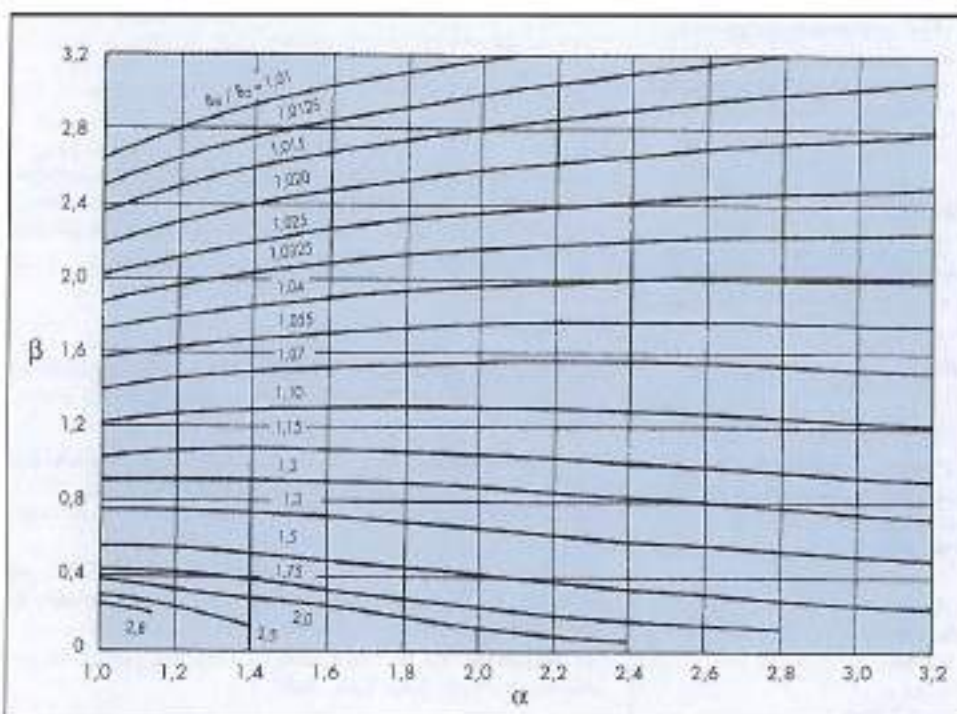


FIGURA 8. Uniformidad de campo en un solenoide simple en función de los parámetros adimensionales α y β [4].

IDEN- HILLO	β	l/l_c	I_c A	$2R_c$ cm	$2L$ cm	LONG. HILO m	COSTE TOTAL *
1	0.73	0.99	34	11.00	13.50	5.493	1.00
2	1.24	0.99	50	9.10	13.00	3.191	0.60
3	3.72	0.91	67	6.95	12.50	1.863	0.41
4	5.40	0.86	93	7.10	12.50	1.379	0.35
5	8.59	0.79	134	7.30	12.50	990	0.32
6	12.62	0.73	178	7.40	12.50	775	0.31
7	16.84	0.69	227	7.60	12.75	609	0.29
8	19.91	0.66	297	7.90	12.75	488	0.27

* Referido al coste total solenoide 1.

TABLA II. Parámetros de diseño del solenoide. Criterio de estabilidad dinámica adiabática.

En dicho caso, según el criterio de estabilidad dinámica, la expresión a emplear vendría dada por la ecuación 9. Para la determinación del parámetro v , es preciso conocer h , el coeficiente de transmisión de calor entre el conductor y el refrigerante. Para el caso de helio líquido en régimen de ebullición nucleada y pulsos de energía inferiores a los 0.01 s, se tiene que $h = 5 \cdot 10^4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Sin embargo es preciso tener en cuenta la capa de aislante del conductor que, aunque en general de poco espesor, hace disminuir notablemente la evacuación de energía del conductor por el reducido valor de su conductividad térmica. Un aislante típico puede tener un valor de $k_a = 5 \cdot 10^{-2} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, y un espesor aproximado de $w = 50 \text{ }\mu\text{m}$. En estas condiciones, el coeficiente efectivo de transmisión de calor resulta ser $h_e = 980 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. En base a ello, y tomando una resistividad para la matriz de Cu a 6 T de $4.2 \cdot 10^{-10} \text{ }\Omega\text{m}$ se tiene que para el conductor número 8 el valor de v es 0.27. Con ello vemos que el numerador del lado derecho de la ecuación 9 toma el valor 1.033.

Puede verse que la variación respecto a la ecuación 8 es del orden del 3.3%, lo cual significa que ambos criterios resultan en diseños prácticamente iguales. Ello es debido a que a pesar de permitir el contacto directo con He líquido, la capa de aislante del conductor, de baja conductividad térmica, hace que las condiciones de trabajo sean muy parecidas al caso adiabático.

4.3. CRITERIO DE ESTABILIDAD CRIOGÉNICA

Si se utiliza el teorema de las áreas iguales para el caso de un hilo superconductor recubierto por una capa delgada de aislante, la condición que determina la densidad máxima de corriente permisible viene dada por:

$$\frac{\lambda^2 J_c^2 \rho}{1 - \lambda} \frac{A}{P} \leq \quad (15)$$

4800 W/m².

En la tabla III puede verse el resultado de aplicar el anterior criterio a cada uno de los hilos considerados. El hilo cuyo empleo resultaría en un diseño de solenoide más económico sería el número 2. Las principales características de dicho diseño serían:

$$\begin{aligned} i &= 0.78 \\ I_c &= 39 \text{ A} \\ 2R_c &= 10.2 \text{ cm} \\ 2L &= 14 \text{ cm} \\ \text{Longitud hilo} &= 4.730 \text{ m} \end{aligned}$$

IDEN- HILLO	l/l_c	I_c A	$2R_c$ cm	$2L$ cm	LONG. HILO m	COSTE TOTAL *
1	1.00	34	11.00	14.00	5.704	1.00
2	0.78	39	10.20	14.00	4.728	0.86
3	0.37	28	9.85	14.00	6.379	1.36
4	0.35	37	10.40	14.00	4.935	1.20
5	0.31	52	11.05	14.00	3.751	1.16
6	0.27	66	11.75	14.00	3.142	1.23
7	0.26	85	12.35	14.00	2.554	1.12
8	0.24	109	13.55	14.00	2.171	1.15

* Referido al coste total solenoide 1.

TABLA III. Parámetros de diseño del solenoide. Criterio de estabilidad criogénica.

El coste de dicho solenoide sería aproximadamente 3.3 veces superior al diseñado según el criterio de estabilidad dinámica mediante el hilo número 8.

5. CONCLUSIONES

Se ha visto que según el criterio de estabilidad que se utilice se pueden obtener diseños muy distintos para una misma aplicación. No sólo varían la longitud del hilo y el coste total sino además el tipo de hilo superconductor a emplear. El criterio de estabilidad criogénica resulta en densidades de corriente permitidas muy inferiores al valor crítico, por lo que en dicho caso resulta más adecuado utilizar hilos del tipo monofilamentar de baja capacidad de transporte de corriente. Por el contrario, el criterio de estabilidad dinámica es menos restrictivo, con lo que permite un mejor aprovechamiento de las elevadas densidades de corriente que presentan los hilos de tipo multifilamentar. Para un mismo hilo superconductor, el extracoste de un diseño basado en el criterio de estabilidad criogénica puede oscilar entre el 50% y el 350% del coste del diseño basado en el criterio de estabilidad dinámica, según el hilo sea de baja o alta capacidad de transporte de corriente respectivamente. Por estos motivos el empleo del criterio de estabilidad criogénica se reserva para aplicaciones a gran escala, donde la necesidad de obtener una total fiabilidad justifica los costes adicionales.

REFERENCIAS

- (1) GARCÍA-TABARES, L. y TAMARIT, J. "Solenoide superconductor de 10 Tesla para almacenamiento de energía eléctrica", *Revista Ingeniería Civil*, núm. 85, 1992.
- (2) IGLESIAS, I.; GARCÍA-TABARES, L. y TAMARIT, J. "Primer prototipo español de almacenamiento de energía en bobina superconductora", *Revista Ingeniería Civil*, núm. 87, 1992.
- (3) BUTLER, A. P.; JAMES, G. B.; MADDOCK, B. J.; and NORRIS, W. T., *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 13, 105, 1970.
- (4) WILSON, M. N. "Superconducting Magnets", *Oxford University Press*, New York, 1983.

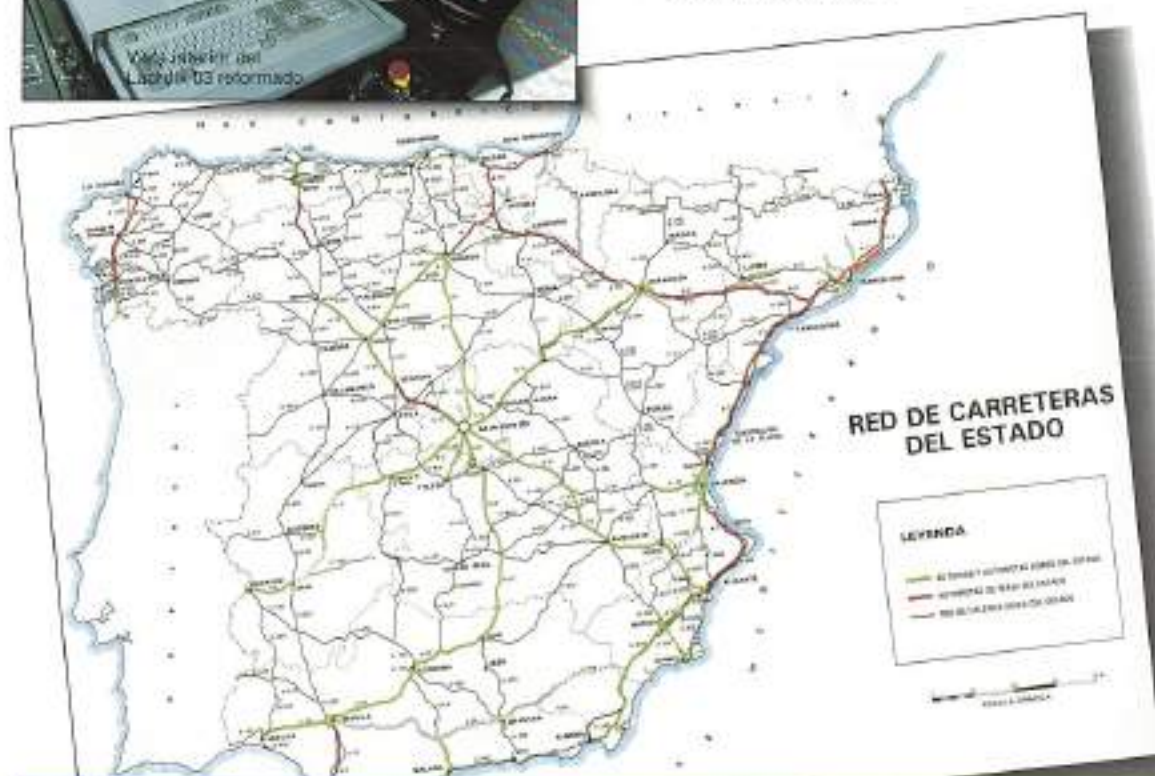
SERVICIO Y CALIDAD

nos vienen de antiguo.

Deflectógrafo Lacroix 03, reformado en la carrocería y en la toma de datos.



- Inventario de carreteras.
- Deflectógrafo Lacroix 03.
- Deflectómetro de impacto DYNATEST HWD 8081.
- Gerpho.
- A.R.S.
- SCRIM con medidor de textura.
- Base de datos GESICA.
- Programa de gestión de firmes GEFIREX.
- Medidor de ruido de rodadura.
- Patología de firmes.



Salida gráfica para plan de refuerzos de las carreteras del Govern Balear.



GEOCISA
GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.

SEDE CENTRAL

Los Llanos de Jerez, 10 y 12
28620 Coslada (Madrid)
Tel. (91) 671 53 00
Fax. (91) 671 64 60

HAY CARRETERAS DONDE NI SIQUIERA MODIFAL PODRIA EVITAR EL AQUA-PLANNING.



PERO HAY OTRAS MUCHAS DONDE SI PODRIA. DONDE REDUCIRIA EL NIVEL DE RUIDOS (HASTA 3 DECIBELIOS), DONDE DISMINUIRIA LA FORMACION DE RODERAS Y FISURAS, Y RETRASARIA EL ENVEJECIMIENTO DEL FIRME AUN EN LAS CONDICIONES CLIMATOLOGICAS MAS EXTREMAS. REPSOL PRESENTA MODIFAL. EL PRIMER BETUN MODIFICADO EN EL QUE LA DISPERSION DE LOS POLIMEROS EN EL SENO DE LOS BETUNES ES PERFECTA Y HOMOGENEA. ESTA HOMOGENEIDAD ES LA QUE PERMITE A MODIFAL CONSERVAR INTACTAS SUS PROPIEDADES AUN EN PERIODOS PROLONGADOS DE ALMACENAMIENTO. ALGUNAS VECES HAY QUE CAMBIAR ALGO PARA QUE TODO SIGA IGUAL. NOSOTROS HEMOS MODIFICADO NUESTROS BETUNES PARA SEGUIR SIENDO LIDERES EN ASFALTOS.



REPSOL PRODUCTOS ASFALTICOS, S. A.