

OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① Número de publicación: **2 265 749**

② Número de solicitud: 200403105

⑤ Int. Cl.:  
**H02H 9/02** (2006.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

② Fecha de presentación: **14.12.2004**

④ Fecha de publicación de la solicitud: **16.02.2007**

④ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:  
**16.02.2007**

⑦ Solicitante/s:  
**Universidade de Santiago de Compostela  
Edificio CACTUS-Campus Sur  
15782 Santiago de Compostela, A Coruña, ES**

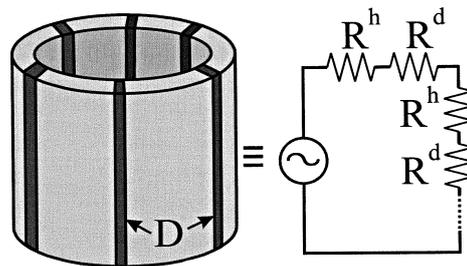
⑦ Inventor/es: **Rodríguez Osorio, Manuel;  
Veira Suárez, Antonio y  
Vidal Costa, Félix**

⑦ Agente: **No consta**

⑤ Título: **Limitador de corriente basado en elementos superconductores con varias zonas débiles creadas artificialmente.**

⑤ Resumen:

Limitador de corriente basado en elementos superconductores con varias zonas débiles creadas artificialmente. El limitador puede ser de tipo inductivo, resistivo o híbrido, y el elemento superconductor está compuesto por una matriz de material superconductor, con una densidad de corriente y temperatura críticas determinadas, en la cual se insertan varias zonas débiles. Éstas pueden fabricarse soldando fragmentos de material con valores más bajos de las propiedades anteriormente mencionadas, o bien realizando cambios en sus dimensiones, por ejemplo, en la sección transversal.



ES 2 265 749 A1

## DESCRIPCIÓN

Limitador de corriente basado en elementos superconductores con varias zonas débiles creadas artificialmente.

## 5 Sector de la técnica

La presente invención es un dispositivo limitador de corriente basado en elementos superconductores, y está destinado para su utilización en la mejora de la calidad y seguridad de los procesos de generación y distribución de energía eléctrica.

10

## Estado de la técnica

Los materiales superconductores presentan la interesante propiedad de poseer una resistencia fuertemente no lineal y dependiente de varias magnitudes: la temperatura, la corriente que se hace circular por ellos y el campo magnético al que se hallen sometidos. Estos materiales están caracterizados por un estado de resistencia cero que se alcanza por debajo de una cierta temperatura crítica,  $T_c$ , por lo que deben estar refrigerados mediante líquidos criogénicos o refrigeradores eléctricos, y por debajo de una corriente,  $I_c$ , y un campo,  $B_c$  (en aspectos de caracterización del superconductor es más propio referirse a la densidad de corriente crítica,  $J_c$ , que es la  $I_c$  por unidad de área atravesada por la corriente,  $J_c = I_c/A$ ). Por encima de estos valores críticos, un superconductor experimenta una transición a un estado disipativo con resistencia no lineal, el cual puede desembocar en un régimen de resistencia óhmica (como la de un metal) si la disipación calienta el material lo suficiente, o bien la corriente circulante excede un segundo valor crítico, denominado  $J^*$  (véanse, por ejemplo, W. Klein *et al.*, *J. Low Temp. Phys.* **61**, 413 (1985); S. G. Doettinger *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 1691 (1994); Z. L. Xiao *et al.*, *Phys. Rev. B* **59**, 1481 (1999); y José María Viña Rebolledo, *Contribución al estudio del transporte eléctrico en capas delgadas de cupratos superconductores: corrientes supercríticas y paraconductividad*, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela (2003)).

25

Este comportamiento no lineal de la resistencia, función de la temperatura, la corriente y el campo magnético aplicado, ha sugerido la utilización de los superconductores en dispositivos de limitación de corriente, destinados a reducir los efectos perniciosos de las altas corrientes y tensiones generadas durante un fallo en una línea de distribución eléctrica, bien sea en una central de producción o una red o ramificación local (T. Verhaege and Y. Laumond 1998, *Handbook of Applied Superconductivity*, **2**, ed B. Seeber (Bristol: Institute of Physics Publishing), p. 1691; W. T. Norris *et al.*, *Cryogenics*, **37**, 657 (1997); W. Paul *et al.*, *Physica C*, **354**, 27 (2001); y P. Tixador, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **4**, 190 (1994)).

30

Dependiendo de la forma en que se inserte el superconductor en el circuito que se quiere proteger, se pueden distinguir dos concepciones fundamentales de limitador: resistivo e inductivo. El primero puede ser simplemente un elemento superconductor (en forma de barra, película delgada, bobina, etc) conectado en serie con el circuito que se quiere proteger. El limitador se diseña de forma que, cuando por la línea circula la corriente nominal, no se exceda el valor crítico,  $I_c$ , de modo que la resistencia que ofrece es nula, y su presencia no se percibe. Sin embargo, cuando ocurre un fallo y la corriente crece hasta valores superiores a  $I_c$ , se produce la transición al estado disipativo (o incluso óhmico), y surge una resistencia que limita de forma efectiva la corriente. Nótese que, en principio, una vez se elimina el fallo de la línea, el superconductor regresa a su estado de nula disipación. El limitador es, por lo tanto, autosuficiente y no necesita de ningún elemento adicional que detecte el inicio o la desaparición de un fallo (el propio dispositivo es un detector). Por otro lado, su reacción es casi instantánea, y responde ante un fallo en tiempos del orden de 1 ms, o menos.

45

El prototipo inductivo tiene un diseño tipo transformador, en el que el primario (generalmente metálico) está conectado directamente al circuito que se quiere proteger, y el secundario es un superconductor en forma de anillo o cilindro hueco. Mientras circula la corriente nominal en el circuito, el flujo magnético que crea el primario en el núcleo magnético es cancelado por el que genera el superconductor, de forma que la inductancia efectiva del transformador es nula, y la única impedancia presente es la resistencia de la bobina primaria (y componentes debidas a posibles inductancias de fuga). Cuando se produce un fallo y se excede  $I_c$ , la transición del superconductor hace que la cancelación de flujo cese, por lo que surge una impedancia de carácter inductivo y resistivo (según el diseño domina una u otra componente) que limita la corriente. En cierto modo, esto puede verse como un transformador ideal cuyo secundario pasa de estar cortocircuitado a estar en circuito abierto.

50

55

En ambos casos, debido a la elevada energía que se disipa en forma de calor en el proceso de limitación de la corriente, es deseable que el limitador no actúe más de unos pocos ciclos de red, que es el tiempo que necesitan los actuales interruptores de circuito para detectar el fallo y abrir la línea (deben esperar a que se alcance un cero de la corriente). Si bien el aumento de la temperatura del superconductor puede ser beneficioso en cuanto a incrementar la impedancia del dispositivo (lo cual debe suceder en un tiempo similar al de reacción, es decir,  $\sim 1$  ms), también puede provocar una recuperación muy lenta del dispositivo una vez eliminado el fallo, ya que el superconductor seguiría disipando y ofreciendo impedancia en la línea, algo indeseable (M. R. Osorio *et al.*, *Applied Superconductivity 1999* (EUCAS'01), *Inst. Phys. Conf. Ser. No 167*, **1**, ed X.; Obradors *et al.* (Bristol: Institute of Physics Publishing, J. W. Arrowsmith Ltd.) p. 1013 (2000); y M. R. Osorio *et al.*, *Physica C*, **372-376**, 1635 (2002)).

60

65

Por otro lado, el sobrecalentamiento puede provocar la degradación del elemento superconductor (incluso su fusión), especialmente debido a la presencia de *puntos calientes* o *zonas débiles*, que son regiones del material con, por

ejemplo, menor temperatura crítica,  $T_c$ , o bien menor densidad de corriente crítica,  $J_c$ . Los superconductores llamados de *baja temperatura crítica* (SBT), cuya  $T_c$  es inferior a la de ebullición del nitrógeno líquido (77 K), suelen ser metálicos, y la homogeneidad es bastante buena. Además, poseen una conductividad térmica elevada ( $\sim 100$  W/m-K), por lo que el calor generado en la transición puede evacuarse con cierta facilidad al medio refrigerante. Estas propiedades los hacen poco sensibles al problema de los puntos calientes. Sin embargo, los *superconductores de alta temperatura crítica* (SAT) son cerámicos y mucho más heterogéneos. Por una parte, en lo que se refiere a la estequiometría, pudiendo coexistir una fase dominante con proporciones no despreciables de precursores o productos intermedios. Por otra parte, tienen una estructura menos uniforme que un metal. Así, los SAT granulares están formados por una multitud de pequeños granos unidos entre sí, de forma que la transición al estado disipativo afecta primero a las fronteras intergranulares y, posteriormente, al interior del grano. Además, su conductividad térmica es mucho más reducida ( $\sim 1$  W/m-K), por lo que si existe una zona débil y se sobrecalienta, su expansión sería lenta y podría producirse un daño local en el material que empeorase las prestaciones del limitador.

El principal problema de las zonas débiles es que, en general, no son capaces por sí solas de dar lugar a una buena limitación de la corriente de fallo. Por ello, asumen una disipación excesiva y pueden acabar por provocar la degradación de todo elemento superconductor y un mal funcionamiento del limitador de corriente. Para que el fallo fuese controlado de forma eficaz, aún habiendo zonas débiles, su extensión y distribución espacial, así como sus propiedades físicas (densidad de corriente y temperatura críticas, resistividad) deberían ser las adecuadas, lo que resulta virtualmente imposible de conseguir por azar. Esto es, las zonas débiles presentes de forma natural en el superconductor nunca darían lugar a esta situación. Podrían ser demasiado pequeñas, o los valores de  $J_c$  muy distintos entre sí, o la resistividad demasiado baja como para dar lugar a una resistencia lo suficientemente grande como para evitar un excesivo aumento de la temperatura, etc.

### Descripción de la invención

Esta invención consiste en un dispositivo, un limitador, capaz de limitar una corriente de fallo en una línea de distribución de energía eléctrica utilizando para ello elementos superconductores. El limitador puede ser de tipo resistivo, inductivo o híbrido, y se basa en uno o varios elementos superconductores formados por fragmentos caracterizados por una densidad de corriente y temperatura críticas determinadas, entre los cuales se insertan, de forma adecuada, fragmentos de material con valores inferiores de las propiedades anteriormente mencionadas, o bien se realizan cambios en las dimensiones (sección transversal). Estos fragmentos se pueden soldar entre sí siguiendo alguno de los procedimientos ya descritos en la literatura para fabricar superconductores de gran tamaño partiendo de fragmentos pequeños que se unen con un material similar (A. Leenders *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **11**, 3728 (2001); K. Iida *et al.*, Physica C, **370**, 53 (2001); y S. Haseyama *et al.*, Physica C, **354**, 437 (2001)). Esta forma de fabricar los elementos superconductores provoca que, durante la actuación del limitador, la mayor parte de la disipación sea asumida por las zonas alteradas (zonas débiles). Por ello, éstas se calientan mucho más que el resto del material. Una vez desaparecido el fallo, la recuperación térmica se realiza no sólo por convección con el medio refrigerante (líquido o gas a temperaturas criogénicas), sino también por la conducción del calor desde las partes calientes hacia las frías. Este mecanismo no tendría lugar si el elemento superconductor estuviese homogéneamente construido, ya que en ese caso todo el flujo de calor sería evacuado exclusivamente por convección al no haber unas partes más frías que las otras.

Por otra parte, al transitar al estado disipativo solamente algunas pequeñas partes del elemento superconductor, su resistencia total podría ser menor que la generada por un elemento homogéneo con un calentamiento uniforme. Este inconveniente puede solventarse diseñando las zonas débiles para que sean muy resistivas en comparación con el resto del material:

1. Cuando la zona débil es un cambio de sección, haciendo esta alteración más acentuada, ya que la resistencia de un camino conductor es igual a  $R = \frac{\rho}{A} \ell$ , siendo  $\rho$  la resistividad del material,  $A$  la sección del camino y  $\ell$  su longitud. A menor sección, mayor resistencia.
2. Cuando la zona débil es un fragmento de diferente material, éste debe tener una resistividad mayor que la del resto de la muestra, de forma que compense la menor longitud de camino,  $\ell$ , que ocupa.

### Ejemplo 1

Un ejemplo de esta concepción es el limitador superconductor inductivo que hemos construido y que presentamos en esta invención. Está formado por un núcleo de hierro-silicio (3%) con tres brazos, con un primario compuesto por dos arrollamientos conectados en serie y localizados en los brazos laterales y un cilindro superconductor de Bi-2223 ( $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.26}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ ) en el central. El esquema del dispositivo muestra en la Figura 1. a., y una fotografía del mismo en la Figura 1. b, y en ellos se pueden ver el núcleo (N), el primario de dos bobinas (P) y el cilindro superconductor (S).

El núcleo está constituido por láminas de material de 0.3 mm de espesor, enrolladas unas sobre las otras, pero aisladas eléctricamente entre sí, para minimizar las pérdidas producidas por las corrientes que se inducen en ellas (el aislante representa una pérdida de material magnético de un 5%). La longitud de camino magnético es de 12.5 cm, y la sección de cada uno de los brazos de 1.6 cm<sup>2</sup>. El campo magnético de saturación,  $B_{\text{sat}}$ , es de aproximadamente 1.7 T,

## ES 2 265 749 A1

5 y la permeabilidad relativa,  $\mu$  5000. El primario está construido con hilo de cobre de 0.5 mm de diámetro y tiene 300 vueltas. El cilindro superconductor tiene 4 cm de altura, 2.1 cm de diámetro interno y 0.25 cm de espesor de pared. Su temperatura crítica es  $T_c = 108$  K, y su densidad de corriente crítica a la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido (77 K) es  $J_c \approx 1000$  A/cm<sup>2</sup>. En este cilindro existe una zona débil que ocupa toda su altura y aproximadamente una  
10 décima parte de su circunferencia, tal y como muestran los experimentos de caracterización realizados. Esta zona débil tiene su origen en defectos estructurales del elemento superconductor o alguna variación local de la estequiometría del material. Como consecuencia de su existencia, el elemento superconductor no se comporta de forma homogénea en toda su extensión.

10 Para estudiar la actuación del limitador, se conectó a un circuito eléctrico en el cual se simuló un fallo al eliminar una resistencia. La impedancia del limitador antes del fallo es de aproximadamente  $1 \Omega$ , y tras el mismo, de  $\approx 2.2 \Omega$ . La corriente que debe circular por el primario para provocar la transición del secundario al estado disipativo es de, aproximadamente, 4 A. El voltaje aplicado es de 9.3 V eficaces.

15 La Figura 2 muestra la variación de la temperatura medida con un termopar en la zona débil, presente de forma natural en la muestra superconductora analizada. Al inicio del fallo (I) se produce la reacción del limitador y la temperatura del elemento superconductor se incrementa. Este aumento es más destacado en la zona débil, ya que sus propiedades son diferentes que las del resto del material del cilindro y, por ello, cuando se produce la transición al estado no superconductor, la disipación es mayor y se calienta más. Al finalizar el fallo (F), el circuito se abre y la disipación Joule cesa, por lo que la temperatura comienza a bajar. Este proceso se llama *recuperación térmica*. Las líneas  
20 representan las predicciones de enfriamiento obtenidas con un modelo puramente convectivo, y cuando además se tiene en cuenta la transmisión de calor por conducción entre la zona débil (caliente) y la fría. Como se puede observar, sólo cuando se tiene en cuenta la combinación de convección y conducción, se predicen los resultados experimentales. Esto indica que el intercambio de calor por conducción contribuye de forma fundamental a la refrigeración de la zona  
25 débil.

Leyenda de la Figura 2:

- 30 - - Datos experimentales  
----- - Sólo convección  
—— - Convección y conducción.

### 35 Ejemplo 2

Otro ejemplo de esta concepción sería el limitador superconductor inductivo de alta potencia que hemos simulado numéricamente utilizando parámetros realistas para el elemento superconductor y el núcleo magnético. La simulación fue realizada con el programa de cálculo Matlab (The Mathworks, Inc, USA).

40 Las características del limitador serían las siguientes:

- Para el núcleo magnético: sección transversal: 50 cm<sup>2</sup> y longitud de camino magnético de 90 cm. El resto de propiedades (material, campo de saturación y permeabilidad, como en el Ejemplo 1).

45 - Para el elemento superconductor: densidad de corriente crítica a 77 K,  $J_c \approx 20$  KA/cm<sup>2</sup>,  $T_c = 108$  K, altura 4 cm, espesor de pared de 0.24 cm y diámetro externo de  $\approx 10$  cm. Se supone que las zonas débiles tienen una resistividad en el estado disipativo ligeramente mayor que el resto del material (1.01 veces, de forma que se calienten más), y que su resistividad de estado normal es el doble.

50 La Figura 3.a. muestra un esquema de cómo sería un cilindro superconductor, por el cual circula una corriente (I), con una zona débil (D) de una longitud (L) igual al 20% de la circunferencia (parte más oscura). En la Figura 3.b., esta zona débil ha sido fragmentada en varias más pequeñas (concretamente 6). De esta forma, el cilindro se puede ver como una asociación en serie de resistencias debidas a la matriz homogénea ( $R^h$ ) y a las zonas débiles ( $R^d$ ).

55 En la Figura 4.a., se puede ver la comparación entre la recuperación térmica para un cilindro homogéneo (sin zonas débiles) y los descritos en la Figura 3. Nótese que, pese a ser mayor la temperatura de las zonas débiles en el momento de abrir el circuito (F), éstas se recuperan antes que el cilindro homogéneo, que se ha calentado de forma uniforme, siempre y cuando su longitud sea pequeña. La Figura 4.b. muestra que la impedancia para el cilindro con zonas débiles es mayor en los primeros compases del fallo (después de I), y finalmente alcanza un valor de en torno al 60% de la impedancia del cilindro homogéneo. Esta relación puede modificarse alterando la resistividad de las zonas débiles en el estado normal, ya que la resistencia que ofrece el superconductor es proporcional a ella. Así, para una resistividad mayor, las curvas de impedancia podrían llegar a igualarse para tiempos mayores de 0.125 s.

65 La Figura 5 muestra cómo este efecto de rápida recuperación térmica depende de la extensión de las zonas débiles. Para una longitud total de zona débil,  $\ell$ , el tiempo de recuperación (normalizado al valor obtenido para un cilindro homogéneo) disminuye a medida que aquélla se fracciona en "n" partes más pequeñas. Esto ocurre hasta un cierto límite (en la figura, hasta  $n \approx 10$ ), por encima del cual ya no hay mejora sustancial.

## ES 2 265 749 A1

Leyenda de la Figura 4:

— - Cilindro homogéneo.

5     · · · · - Cilindro con una zona débil de longitud un 20% de la circunferencia.

---- - Cilindro con la zona débil dividida en 10 pequeños fragmentos.

10    Leyenda de la Figura 5:

— - Puntos calculados

— - Línea para los ojos.

15

### Ejemplo 3

Otra posible forma de crear zonas débiles artificialmente es, en vez de soldar fragmentos de superconductor con diferentes propiedades, partir de un elemento superconductor homogéneo y practicar cambios en su sección transversal. De esta forma, se alteran localmente la corriente crítica y la resistencia sin necesidad de alterar las características básicas del material (esto es, densidad de corriente crítica y resistividad). En la Figura 6 se pueden ver ejemplos de cambios de sección realizados localmente: estrechamiento de pared (S) y reducción de la altura (H). Este método puede aplicarse en varias zonas aunque, por simplicidad, los dibujos sólo muestren una. Los resultados serían equivalentes a los obtenidos en el Ejemplo 2.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

5 1. Limitador de corriente basado en elementos superconductores con varias zonas débiles creadas artificialmente,  
y que puede ser de tipo inductivo, resistivo o híbrido, **caracterizado** por estar constituido por uno o más elementos  
superconductores formados por una matriz de propiedades homogéneas en la cual se insertan de forma alternada varias  
zonas débiles de longitud mucho menor que la de todo el elemento; éstas se caracterizan por tener valores inferiores  
de la corriente y/o temperatura críticas que la matriz, y pueden ser fragmentos de material superconductor diferente y  
10 más resistivo que se sueldan a ella o bien regiones en las que se ha reducido mecánicamente la sección transversal; de  
forma que la menor corriente y/o temperatura crítica de las zonas débiles hacen que éstas ofrezcan una resistencia no  
nula incluso cuando el resto del material sigue en estado superconductor.

15 2. Limitador de corriente superconductor, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque las zonas débiles son  
fragmentos más resistivos que la matriz, bien porque se han reducido sus dimensiones, por ejemplo la sección trans-  
versal, bien porque su resistividad se ha incrementado al añadir defectos en el material, tales como impurezas; de  
esta forma se pueden conseguir valores de la impedancia del limitador comparables al caso en que los elementos  
superconductores son homogéneos.

20 3. Limitador de corriente superconductor, según las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque se utiliza en  
los procesos de producción y distribución de la energía eléctrica para reducir los altos voltajes y corrientes que surgen  
cuando tiene lugar un fallo en alguno de los elementos que componen la red eléctrica; este fallo puede ser debido a un  
cortocircuito, la caída de un rayo, un pico de tensión, etc.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

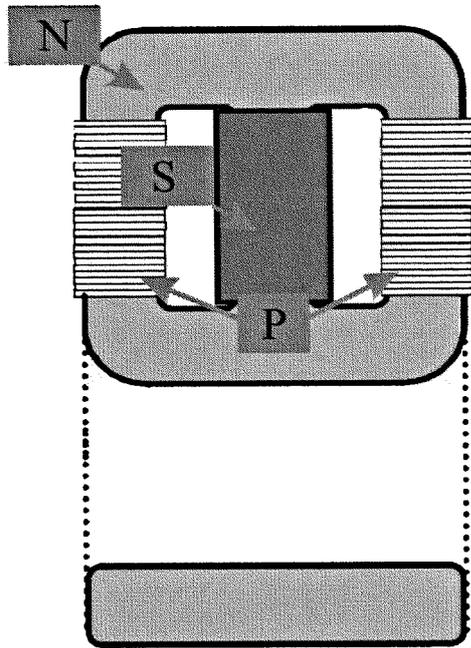


Fig. 1. a

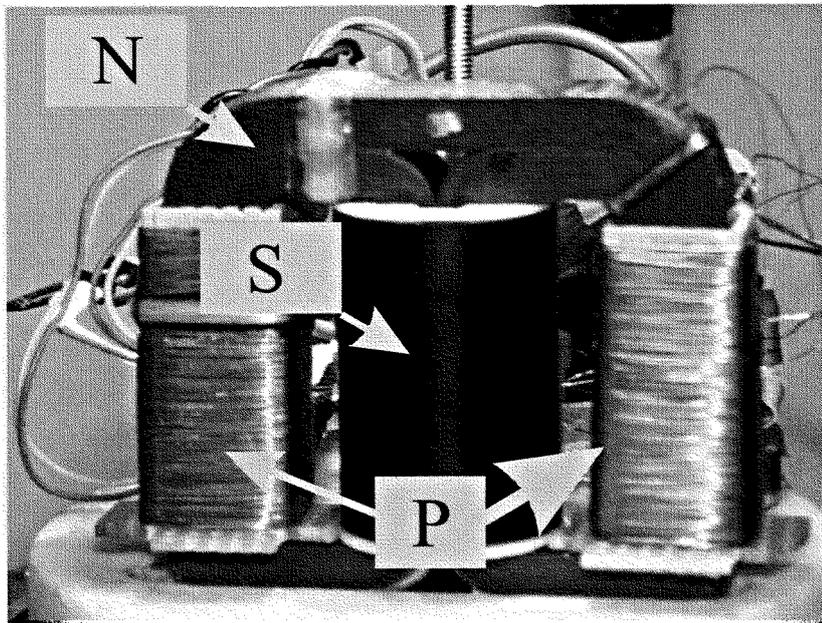


Fig. 1. b

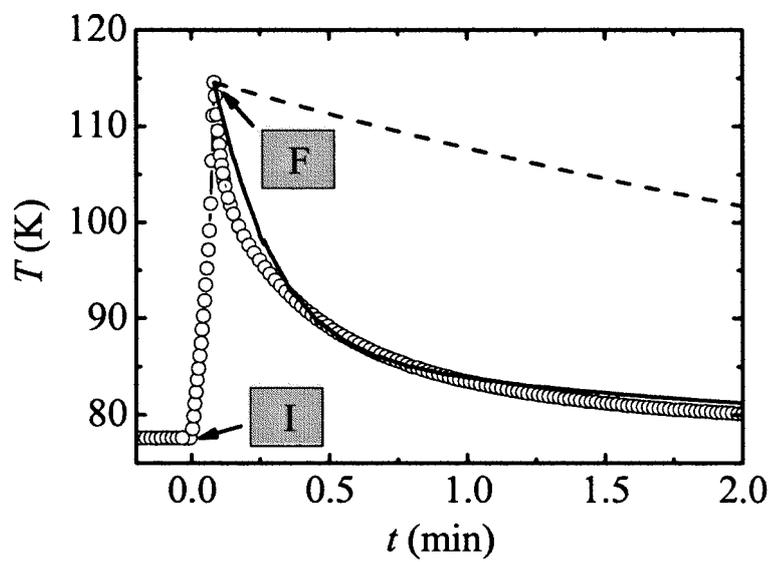


Fig. 2

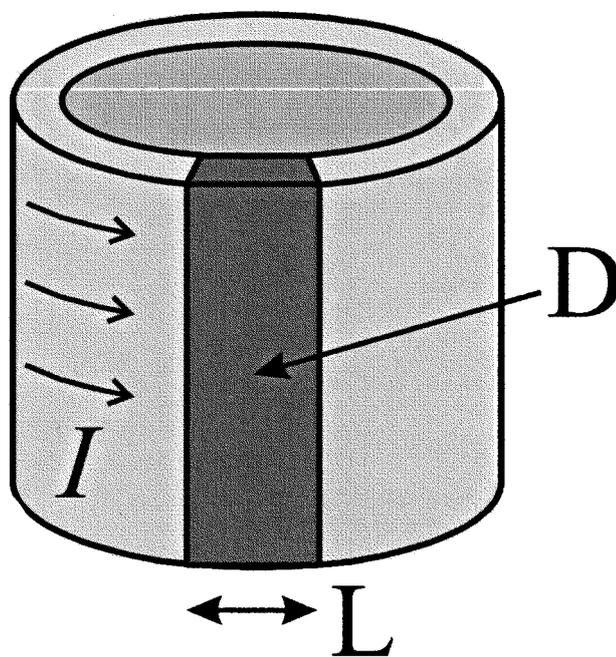


Fig. 3.a.

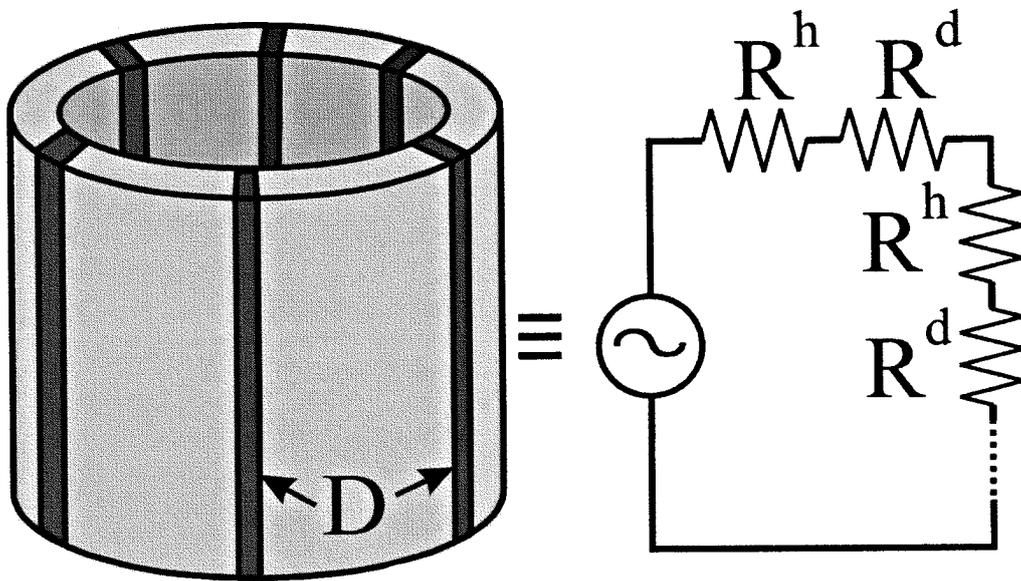


Fig. 3.b.

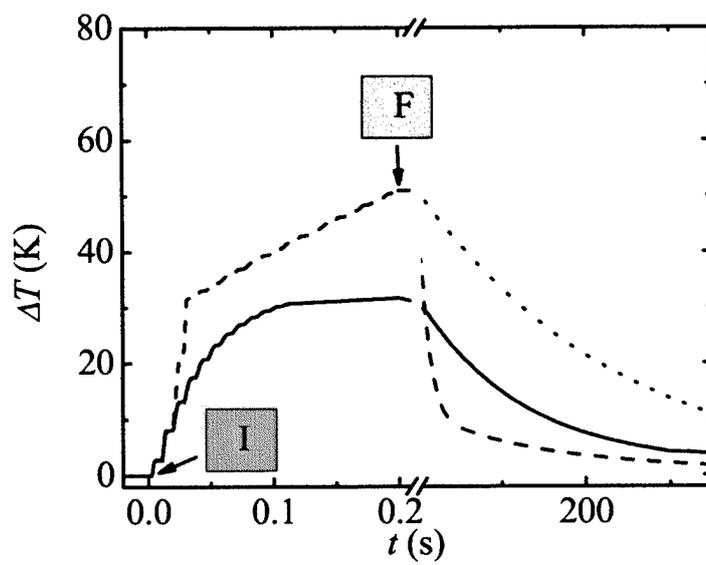


Fig. 4.a.

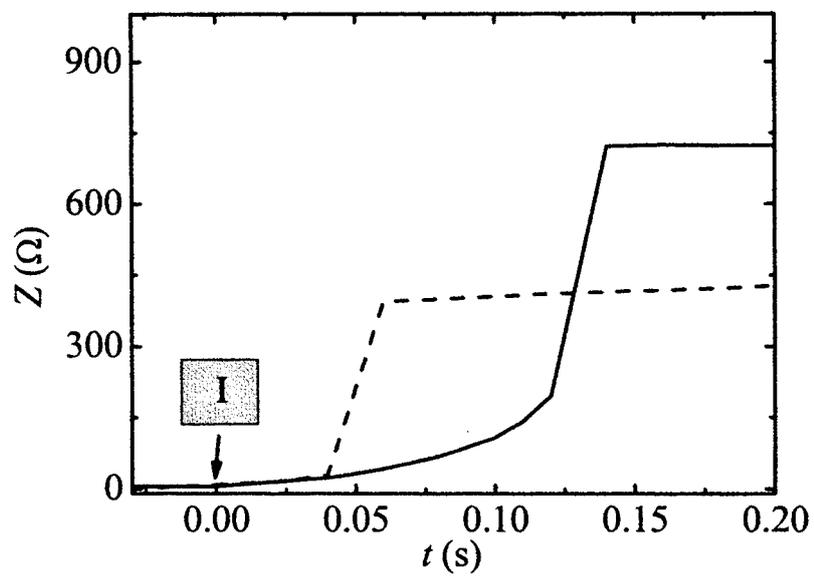


Fig. 4.b.

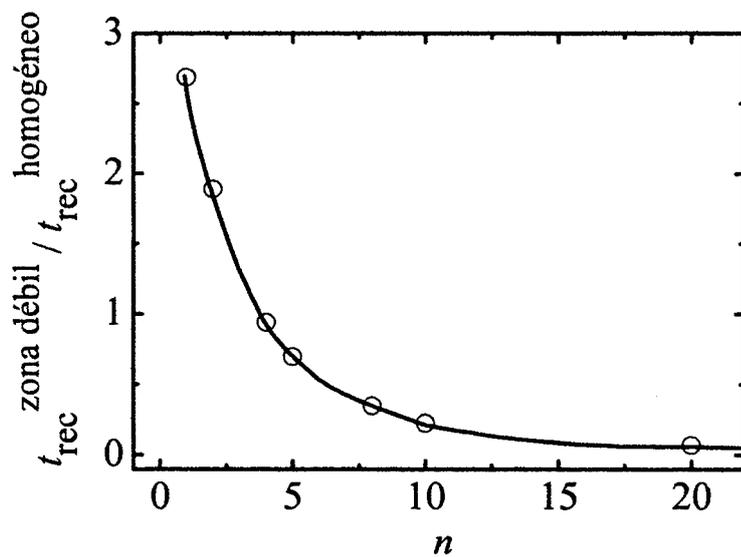


Fig. 5

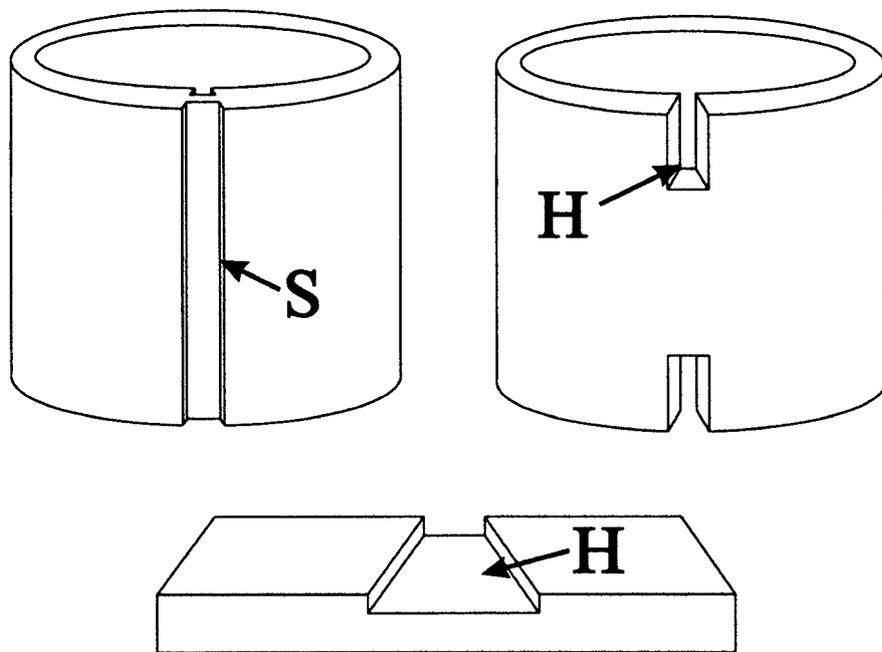


Fig. 6



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 265 749

② Nº de solicitud: 200403105

③ Fecha de presentación de la solicitud: 14.12.2004

④ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: **H02H 9/02** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

| Categoría | Documentos citados   | Reivindicaciones afectadas |
|-----------|--|----------------------------|
| A         | DE 4119983 A1 (HOECHST AG) 24.12.1992, columna 2, líneas 27-67; figura 1.  | 1-3                        |
| A         | EP 0345767 A1 (ASEA BROWN BOVERI AB) 13.12.1989, columna 4, líneas 8-20; columna 5, líneas 4-28; reivindicación 1. | 1-3                        |
| A         | DE 19524597 A1 (ABB PATENT GMBH) 09.01.1997, resumen; figura 1.  | 1-3                        |
| A         | DE 4418050 A1 (ABB RESEARCH LTD) 05.01.1995, resumen; figura 1.  | 1-3                        |
| A         | EP 0620570 A1 (NGK INSULATORS LTD) 19.10.1994, resumen; figura 4.  | 1-3                        |
| A         | JP 1089922 A (TOKYO SHIBAURA ELECTRIC CO) 05.04.1989, resumen; figuras.  | 1-3                        |

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe

29.01.2007

Examinador

L. García Aparicio

Página

1/1