



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **2 334 616**

⑫ Número de solicitud: 200800298

⑮ Int. Cl.:
H01B 12/00 (2006.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

⑫ Fecha de presentación: **04.02.2008**

⑬ Fecha de publicación de la solicitud: **12.03.2010**

⑭ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:
12.03.2010

⑰ Solicitante/s:
Universidade de Santiago de Compostela
Edificio CACTUS-Campus Sur
15782 Santiago de Compostela, A Coruña, ES

⑱ Inventor/es: **Rodríguez Osorio, Manuel;**
François, Maurice-Xavier;
Betrancourt, Adrien;
Veira Suárez, Antonio y
Vidal Costa, Félix

⑳ Agente: **No consta**

② Título: **Limitador superconductor de corriente integrado en el intercambiador de calor de un refrigerador termoacústico.**

③ Resumen:

Limitador superconductor de corriente integrado en el intercambiador de calor de un refrigerador termoacústico. Limitador de corriente superconductor (inductivo, resistivo o híbrido) en el que el elemento superconductor es mantenido a temperaturas criogénicas mediante un refrigerador termoacústico. El elemento superconductor se adhiere a la superficie del intercambiador de calor frío del refrigerador, de tal forma que entre ambos se hallan una capa de material aislante eléctrico, y otra de un buen conductor térmico que garantiza que la temperatura en el superconductor sea estable en toda su extensión y que el calor producido en él por disipación durante la actuación del limitador sea rápidamente transferido por conducción térmica al intercambiador de calor.

ES 2 334 616 A1

DESCRIPCIÓN

Limitador superconductor de corriente integrado en el intercambiador de calor de un refrigerador termoacústico.

5 Sector de la técnica

Limitador de corriente superconductor utilizado para limitar las corrientes de fallo en sistemas de producción y transporte de potencia 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)).

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)).

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 limitador resistivo 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.

El limitador 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.

El limitador híbrido presenta características comunes a los dos anteriores. En este caso el secundario del transformador es una bobina, generalmente metálica, a la cual se conecta un elemento superconductor (masivo o película delgada), de forma indiferente (es decir, no hace falta que se trate de un anillo o cilindro, como sucede en el limitador inductivo). El principio de funcionamiento es análogo al del inductivo. En estado superconductor la bobina secundaria cancela el flujo creado por el primario. Cuando el elemento superconductor transita, su resistencia no nula rompe la igualdad de flujos, y surgen dos componentes de impedancia: una resistiva y otra inductiva.

En los tres 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 en la onda de 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, ~ 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 (véanse, por ejemplo, M. R. Osorio *et al*, *Physica C*, **372-376**, 1635 (2002) y M. R. Osorio *et al*, *Supercond. Sci. Technol.*, **18**, 739-746 (2005)).

Por otro lado, el sobrecalentamiento puede provocar la degradación del elemento superconductor (incluso su fusión), especialmente debido a la presencia de *puntos calientes* originados por *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 (~ 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 de las reacciones químicas necesarias. Por otra, 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 (~ 1 W/m-K, unas 100 veces menor que en el caso de los metales más comunes), 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.

La refrigeración de los dispositivos superconductores requiere un sistema de producción de líquidos criogénicos (generalmente se trata de helio o nitrógeno) y de una renovación constante del fluido refrigerante. Para lograr una mayor independencia, se ha propuesto utilizar compresores de tipo mecánico, capaces de obtener bajas temperaturas utilizando para ello un gas de intercambio térmico (ver, por ejemplo, O. P. Anashkin *et al*, *Cryogenics*, **42**, 295 (2002) y M. Steurer *et al*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **10**, 840 (2000)). Sin embargo, los dispositivos mecánicos tienen un mantenimiento relativamente elevado, sufren averías debido a la presencia de partes móviles que se desgastan y utilizan con frecuencia fluidos refrigerantes que son altamente perjudiciales para el medio ambiente. Por ello, se ha propuesto sustituir estos aparatos por los llamados “refrigeradores termoacústicos” (G. Swift, “Termoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators”, New York: Acoustic Society of America, 2001). Estos dispositivos se basan en la utilización de una onda longitudinal para transportar el calor desde el punto que se quiere enfriar hasta otro en el cual la energía térmica es emitida al exterior de la máquina. Estos aparatos están compuestos de cuatro partes fundamentales: motor termoacústico, resonador, refrigerador termoacústico y carga acústica. En la figura 1 se muestra un esquema del dispositivo y todos sus componentes, así como el perfil de temperaturas a lo largo del mismo. En el eje y se da la temperatura en unidades arbitrarias, y en el eje x la posición a lo largo de la máquina termoacústica. A continuación se detallará el papel de cada parte y se explicará sucintamente el principio de funcionamiento.

El interior del aparato está lleno de un gas inerte como el helio o el nitrógeno, a alta presión (decenas de bares). Cuando se dan unas condiciones determinadas, se genera una onda que resuena en el tubo, y que da lugar a una pequeña variación de presión, llamada “presión dinámica”, que se superpone a la presión estática del gas. Esta onda permitirá hacer trabajo en el refrigerador y extraer el calor desde el punto que se quiere enfriar. A continuación se detalla el papel de cada uno de los componentes de este dispositivo:

Motor termoacústico (M): está formado por dos intercambiadores de calor y, en medio de ellos, un apilamiento de placas conocido como “stack” (G), en el que se crea un fuerte gradiente de temperatura (varios cientos de grados Celsius). El calor se inyecta a través del intercambiador caliente (H) (por medio de la disipación Joule en una resistencia, una placa solar, etc) y el exceso es evacuado tras llegar al segundo intercambiador (F), que se mantiene a temperatura ambiente gracias a un circuito de flujo de agua. El gradiente así establecido provoca la amplificación de las vibraciones naturales de las moléculas de gas, de forma que se genera una onda acústica que resuena dentro del conjunto de la máquina. Esta onda es estacionaria, es decir, el desfase entre la presión dinámica y la velocidad de la onda es 90° . La frecuencia está pues dada por la longitud de todo el dispositivo. En general, la longitud de onda es aproximadamente dos veces la longitud de todo el aparato.

De esta forma, de la potencia térmica que entra en el motor, una parte se emplea en generar la potencia acústica (P), y el resto se evacua a través del intercambiador a temperatura ambiente, o bien se pierde debido a los procesos naturales de conducción en las paredes y radiación. El ciclo termodinámico que permite generar la onda se llama ciclo de “Brayton”. Para que éste se produzca, la onda debe ser estacionaria, con la presión y la velocidad en cuadratura (es decir, a 90°).

Resonador (RS): se trata de un tubo, generalmente de acero, cuya longitud permite fijar la frecuencia de la onda que se genera en el motor. El diámetro puede ser fijo o variar en diferentes partes del tubo, dependiendo de la frecuencia que se desee.

Refrigerador termoacústico (RF): en este componente se produce el efecto inverso al que generaba la onda en el motor. La potencia acústica es utilizada para extraer calor del intercambiador frío (C) (que puede estar conectado a un circuito o cavidad que se desea enfriar) y llevarlo, a través de un medio poroso conocido como “regenerador” (D) hasta otro intercambiador a temperatura ambiente (E) que, como en el caso del intercambiador del motor, permite eliminar el calor de exceso y está refrigerado por medio de un circuito de agua. El ciclo termodinámico que se produce dentro

del regenerador se llama de "Ericsson", y requiere que la onda sea progresiva, no estacionaria (es decir, la presión y la velocidad deben estar en fase).

Carga acústica (CA): está compuesta por una constricción, un tubo largo y fino (llamado "inertancia") y una cavidad de diámetro mucho mayor que cualquiera de los tubos (que llamaremos "capacidad"). Estos elementos se utilizan para modificar localmente el desfase entre la presión y la velocidad, y lograr así que la onda sea de tipo progresivo dentro del refrigerador. Se puede demostrar que su papel es equivalente al que juegan una resistencia eléctrica, un inductor y un condensador en un circuito de corriente alterna.

La carga acústica se conecta al refrigerador a través de un nuevo intercambiador de calor (A) y un tubo intermedio (B). El intercambiador permite eliminar el calor residual producido por la disipación de energía en la carga acústica (especialmente en la constricción). El tubo intermedio o "buffer tube" aísla el refrigerador de este intercambiador, y puede estar recubierto internamente por un material que sea mal conductor del calor. La apertura del orificio que juega el papel de resistencia viene dada por un coeficiente de flujo habitualmente utilizado por los fabricantes de válvulas en E.E.U.U. Cuanto menor es éste, más estrecha es la constricción.

Hasta ahora lo habitual es que el intercambiador frío del refrigerador se conecte mediante un circuito aislado térmicamente con una cavidad en la que se introduce aquello que se quiere mantener a baja temperatura. Esto puede hacerse con el limitador de corriente. No obstante, la eficiencia de la refrigeración se ve disminuida, ya que la máquina debe enfriar no solo el limitador, sino también el circuito intermedio completo. Además, el tiempo necesario para extraer el calor desde el elemento superconductor cuando se produce un fallo es netamente superior. La presente invención propone una solución a estos inconvenientes.

Descripción de la invención

La presente invención consiste en la asociación de un limitador superconductor de corriente (resistivo, inductivo o híbrido, como por ejemplo el de la Figura 3) y un refrigerador termoacústico. El dispositivo se diseña de forma que el elemento superconductor (SP, en las Figuras 2 y 3) se halla adherido de forma directa sobre la superficie del intercambiador de calor frío (C, en las Figuras 1, 2 y 3) de un refrigerador termoacústico. El superconductor puede estar adherido en la superficie exterior del intercambiador de calor (siguiendo su perímetro, por ejemplo), o bien sobre una de sus caras (como en la Figura 2(a), preferiblemente la cara izquierda en el esquema de la Figura 1), sin que se obstruyan en lo posible los canales de paso del gas (O, en las Figuras 2 y 3). En este último caso, la otra superficie (situada a la derecha en la Figura 1) puede quedar en buen contacto térmico con el regenerador (D, en la Figura 1).

La forma en que se produce el acoplamiento entre el intercambiador de calor y el superconductor es la parte fundamental de la invención. *A priori*, y para entorpecer lo menos posible el flujo de gas a través de los orificios del intercambiador de calor, lo más sencillo es colocar el elemento superconductor sobre una base de alta conductividad térmica (cobre, por ejemplo), soldada al intercambiador de calor. De esa forma, el calor fluye a través de esta base, que actúa como anclaje térmico. Sin embargo, esta configuración, aunque posiblemente válida para dispositivos menos sensibles a la temperatura (como el semiconductor de la patente US5901556 A) no es apta para el caso de un superconductor que ocupa una mayor extensión (en parte determinada por la potencia a la que se va a utilizar el limitador), como vamos a ver a continuación.

Para facilitar el análisis del problema usaremos la Figura 4, en la cual se muestra una sección del refrigerador termoacústico, en la que I es el intercambiador de calor, R el regenerador, P la pared del tubo, C los canales del intercambiador (de forma esquemática, ya que deberán ser más numerosos y de menor diámetro), B una base sobre la que se asienta el elemento que se quiere refrigerar (en este caso un superconductor, S). La base se aleja del intercambiador una longitud D. T1 y T2 son las temperaturas en ambos extremos de la base. Este método de sujeción del elemento que se quiere refrigerar, que es válido para el ejemplo del semiconductor es, sin embargo, totalmente inadecuado para nuestros propósitos por dos razones básicas:

- 1) El camino superconductor (S) que describimos deberá ocupar varios centímetros cuadrados, por lo que el extremo más alejado del intercambiador de calor (I) estaría alejado varios cm (distancia D). Esto provocaría necesariamente un gradiente de temperatura entre sus extremos, ya que sólo el intercambiador de calor frío está a 80 K. Entre el extremo izquierdo del intercambiador y el lado derecho, en contacto con el regenerador (R) se puede tomar una temperatura constante $T_1=80$ K, por ejemplo, mientras que a una distancia D se tiene una temperatura $T_2 \gg T_1$. Podría conseguirse que durante el funcionamiento normal del sistema todo el elemento superconductor estuviese a 80 K, usando una base de cobre que estabilizase la temperatura en todo el sistema base-camino superconductor (B en la figura 1). Sin embargo durante un fallo, e inmediatamente tras él, no se tendría la misma temperatura en todo el elemento superconductor. Este inconveniente, secundario para el caso de un semiconductor, es insoslayable cuando se trata de un superconductor: la corriente crítica, I_c , depende fuertemente de la temperatura. Es inadmisibles tener diferentes valores de I_c en distintas partes del camino superconductor, ya que la transición sería no homogénea, y podría producirse disipación en régimen normal de funcionamiento (es decir, en ausencia de fallos en la línea de distribución de potencia).

- 2) La base de cobre que, hipotéticamente, puede estabilizar la temperatura de todo el circuito representa, por otro lado, un punto de entrada de calor permanente en el sistema. Considerando que el extremo fijado al intercambiador de calor está a 80 K, el otro estará sin embargo a una temperatura más elevada (intermedia entre los 80 K y la del gas a varios cm del intercambiador), con lo que el gradiente térmico es considerable. Esto puede forzar a sacrificar parte de la potencia de extracción del refrigerador sólo para eliminar este calor espurio. Teniendo en cuenta que, en cualquier refrigerador, a medida que la temperatura baja desciende la potencia que se puede extraer, esta configuración representa un problema serio en la implementación del dispositivo. Por otro lado, la base de cobre puede alterar demasiado el flujo de gas en las proximidades del intercambiador, aspecto que hay que estudiar en detalle antes de la fabricación del dispositivo.

Así, la mejor opción es adherir el superconductor al intercambiador de calor frío mediante una sustancia que sea buena conductora del calor pero que se comporte a la vez como un aislante eléctrico. De esta manera, el calor generado por la disipación de potencia eléctrica en el elemento superconductor se transmite rápidamente por conducción al intercambiador de calor frío y de ahí es transportado a lo largo del regenerador hasta el intercambiador de calor a temperatura ambiente (E, en la Figura 1), donde es evacuado por un circuito de agua auxiliar que, por simplicidad, no se halla descrito en la Figura 1. Este procedimiento permite una simplificación importante en la construcción del sistema de refrigeración, ya que evita la necesidad de utilizar una cavidad externa (dentro de la cual estaría el limitador) conectada mediante un circuito auxiliar al refrigerador. Además, dado que el elemento superconductor está directamente en contacto con el intercambiador de calor frío, se acelera el proceso de eliminación del calor producido durante la actuación del limitador, y se facilita que éste esté de nuevo operativo en un tiempo en torno a un segundo, tal y como se requiere en los sistemas de distribución de potencia eléctrica (V. Meerovich and V. Sokolovsky, *Supercond. Sci. Technol.*, **20**, 457 (2007)).

El elemento superconductor puede ser de tipo masivo (ya sea una muestra granular o un monodominio), aunque preferiblemente es un hilo delgado o una película superconductora, cuyo espesor está típicamente entre 100 nm y 1 μ m, por lo que el calor producido debe recorrer una distancia mucho menor que en una muestra masiva, en la que las dimensiones características son de milímetros o centímetros. Debido a esto, el calor se puede evacuar mucho más rápidamente. Las películas se hacen crecer sobre un sustrato adecuado, generalmente de titanato de estroncio o zafiro (SrTiO_3 y Al_2O_3 , respectivamente), que tienen una elevada conductividad térmica, pero son aislantes eléctricos. Esta última propiedad permite usar una sustancia adherente que simplemente cumpla el requisito de tener una alta conductividad térmica. De esta forma, no hay contacto eléctrico entre el metal del intercambiador de calor (normalmente cobre) y la película superconductora y, al mismo tiempo, el calor viaja con facilidad desde la película hacia el sustrato y de ahí hasta el intercambiador de calor frío. Este último actúa inicialmente de masa térmica, absorbiendo el calor producido en el elemento superconductor durante el fallo. Posteriormente, este calor se cede al regenerador (D) mediante el gas que llena todo el refrigerador termoacústico, y de ahí pasa al intercambiador de calor a temperatura ambiente (E).

Ejemplo 1

Mediante el software de simulación de dispositivos termoacústicos de la SOCIÉTÉ HEKYOM (Orsay, Francia), se realizó un cálculo preliminar de las dimensiones de un refrigerador a 80 K, capaz de extraer unos 50 W, así como de la carga acústica correspondiente para una potencia acústica de entrada de unos 500 W a una frecuencia de 70 Hz. La dimensión más importante en este ejemplo es el diámetro del regenerador (D en la Figura 1), ya que determina el tamaño del intercambiador de calor frío (C en las Figuras 1, 2 y 3) y por tanto el espacio útil para insertar el superconductor que debe ser refrigerado. En concreto, el regenerador que usamos tiene un diámetro de 5.6 cm.

A 80 K es complicado tener una capacidad de extracción que sea superior a unas decenas de vatios. En cuanto a la potencia de entrada, es un valor razonable para un motor termoacústico, salvo que se utilice un sistema de amplificadores (D. L. Gardner and G. W. Swift, *J. Acoust. Soc. Am.*, **114**, 1905 (2003)). En este ejemplo las características del motor no se han calculado. Simplemente se ha supuesto que la potencia acústica es generada por algún elemento externo.

Posteriormente, y teniendo esto en cuenta, se procedió a calcular un prototipo de limitador de corriente que pudiese satisfacer los siguientes requerimientos:

- 1- Tener un elemento superconductor de tamaño reducido, tal que pueda acoplarse sobre la superficie del intercambiador sin, menguar de forma significativa la potencia extraíble. Se puede considerar que esto se consigue siempre y cuando la porosidad del intercambiador no se vea muy reducida. Esto quiere decir que el elemento superconductor debe estar adherido de forma que obstruya el menor número posible de canales del intercambiador de calor, a través de los cuales fluye el gas que llena la máquina termoacústica.
- 2- Ser útil a una potencia media/alta y ofrecer unas buenas prestaciones durante fallos de diversa amplitud.
- 3- No disipar durante un fallo típico (unos 100 ms) más energía de la que puede evacuar el refrigerador.

ES 2 334 616 A1

Un limitador inductivo es de difícil implementación, ya que el transformador ocupa demasiado espacio en el intercambiador (puede ser viable para un limitador de baja potencia, ya que entonces el núcleo puede ser de pequeño tamaño). Por ello, las mejores opciones son el limitador resistivo y el híbrido (resistivo/inductivo). En este ejemplo se utilizará un prototipo híbrido, ya que el limitador resistivo tiene dos inconvenientes que, si bien no son tan importantes como el que permitió descartar el limitador inductivo, sí son relevantes:

- 1- El único origen de la impedancia es la resistencia del propio elemento superconductor. Ello puede obligar a usar una longitud excesiva para el espacio disponible dentro del intercambiador de calor.
- 2- Toda la potencia debe disiparse en el propio elemento superconductor, por lo que su temperatura puede llegar a ser excesiva, y eso reduce la capacidad de recuperar el limitador en un tiempo corto.

En la Figura 3 se muestra una visión axial del conjunto intercambiador/limitador híbrido. El primero se representa como una pieza circular (C) con múltiples perforaciones (O), a través de las que debe pasar el gas durante las expansiones y rarefacciones forzadas por la onda. El limitador está compuesto de un núcleo externo (N) que rodea al intercambiador, aunque no tiene por qué hacerlo, pudiendo estar simplemente a un lado, dos bobinados (en principio metálicos), el primario (P) en el cual el generador externo impone un voltaje (V), y el secundario (S) en el cual se conecta un elemento superconductor (SP) en forma de camino de meandros (puede tener cualquier forma y ser, por ejemplo, una semicircunferencia). El bobinado primario está conectado al circuito que se quiere proteger. El bobinado secundario está acoplado magnéticamente con el primario y como ya se ha dicho, se halla directamente conectado al elemento superconductor, que es el único que está dentro del dispositivo refrigerador.

En este ejemplo, las características del limitador son las siguientes:

- *Potencia nominal*: 220 V x 10 A.
- *Núcleo*: se supone hecho de acero con un 3% de silicio. Es una aleación típica de los transformadores de potencia. El campo de saturación es 1.7 T y la permeabilidad relativa máxima está alrededor de 5000. La longitud y la sección del camino magnético son 0.6 m y 0.14 x 0.14 m², respectivamente.
- *Bobinados*: se suponen hechos de cobre, con diámetros de 3 y 4 mm para primario y secundario, siendo el número de vueltas igual a 60 y 15, respectivamente.
- *Camino superconductor*: se trata de una película de YBCO, de 5 mm de anchura, 10 cm de longitud y 1 μm de espesor. El sustrato es SrTiO₃ y tiene 0.5 mm de espesor. La temperatura crítica es de unos 90 K, la densidad de corriente crítica, J_c , es de 4x10⁶ A/cm² y la resistividad de estado normal es igual a 43 μΩ-cm a 100 K.

La sección del núcleo se calculó para evitar que, aplicando el voltaje nominal, el núcleo entrase en la región de saturación magnética. Por ello, se aplicó la ecuación:

$$A \geq \frac{V_{\text{eficaz}} \sqrt{2}}{\pi \nu N_p B_{\text{sat}}},$$

en la que A es la sección del brazo del núcleo, V_{eficaz} el voltaje aplicado, ν la frecuencia (se supone igual a 50 Hz), N_p el número de vueltas del primario y B_{sat} el campo de saturación del núcleo.

Para estudiar el funcionamiento del limitador, se simuló diferentes fallos al reducir el valor de una impedancia de carga que se supone conectada en serie con el circuito. El voltaje nominal no se varió a lo largo del proceso.

La figura 5(a) muestra la corriente limitada (eje de la izquierda, en línea continua) y la que circularía en el circuito si no hubiese limitador (eje de la derecha, en línea discontinua), para un fallo de gran amplitud nominal. El valor esperado es de 1 kA, aproximadamente, pero la corriente es fuertemente reducida incluso por debajo del valor nominal (10 A), hasta unos 3 A, en un tiempo inferior a 1 ms. En la figura 5(b) se muestran la potencia instantánea disipada en el elemento superconductor (eje de la izquierda, en línea continua) y la energía correspondiente (eje de la derecha, en línea discontinua), obtenida al integrar la potencia instantánea. Excepto un pico inicial extremadamente fino, la potencia disipada es rápidamente reducida por debajo de los 800 W. Esto da una energía aproximadamente igual a 30 J, que es un valor inferior al tope de la capacidad de extracción del refrigerador termoacústico que se había diseñado. En cuanto al incremento de temperatura en el camino superconductor, la figura 5(c) muestra que se ha sobrepasado la temperatura crítica, pero el valor máximo es de unos 130 K. Este valor no es demasiado elevado y no representa ningún riesgo de daño para la muestra superconductora.

REIVINDICACIONES

1. Limitador superconductor de corriente, de tipo resistivo, inductivo o híbrido, que se utiliza para reducir la amplitud de las tensiones y corrientes durante un fallo en una línea de distribución eléctrica, **caracterizado** porque el elemento superconductor se haya adherido a la superficie del intercambiador de calor frío de un refrigerador termoacústico que lo mantiene a temperaturas criogénicas, mediando entre el superconductor y el intercambiador de calor una capa de material que sea aislante eléctrico y otra de un material que sea un buen conductor del calor.

2. Limitador superconductor de corriente, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque el elemento superconductor puede ser de tipo masivo (granular o monodominio), aunque, para facilitar su refrigeración, es preferiblemente es una película delgada o un hilo delgado superconductor.

3. Limitador superconductor de corriente, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque adherir el elemento superconductor sobre el intercambiador de calor frío garantiza que todo él se halle a la misma temperatura y que además todo el calor generado durante la actuación del limitador de corriente sea evacuado por conducción térmica hacia el intercambiador de calor en un tiempo competitivo para su aplicación en la industria de producción y distribución eléctrica.

4. Limitador superconductor de corriente, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque el elemento superconductor se dispone de forma que no evite el paso del gas a través de los canales del intercambiador de calor.

5. Limitador superconductor de corriente, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque su configuración permite escalarlo a mayores potencias cuando se incrementa el diámetro del refrigerador termoacústico.

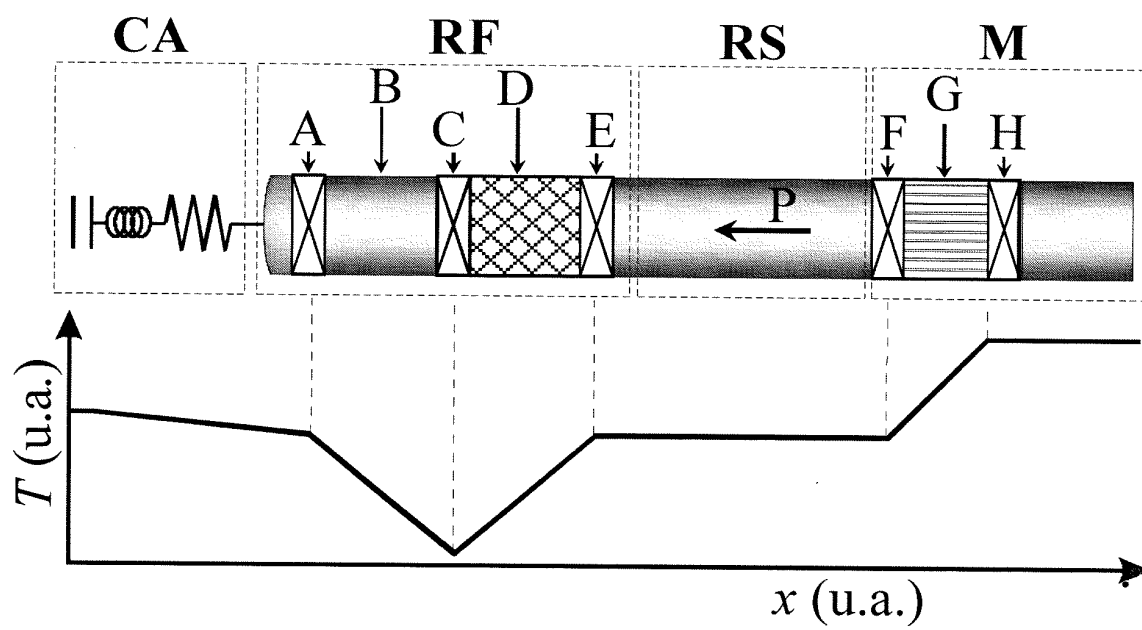


Figura 1

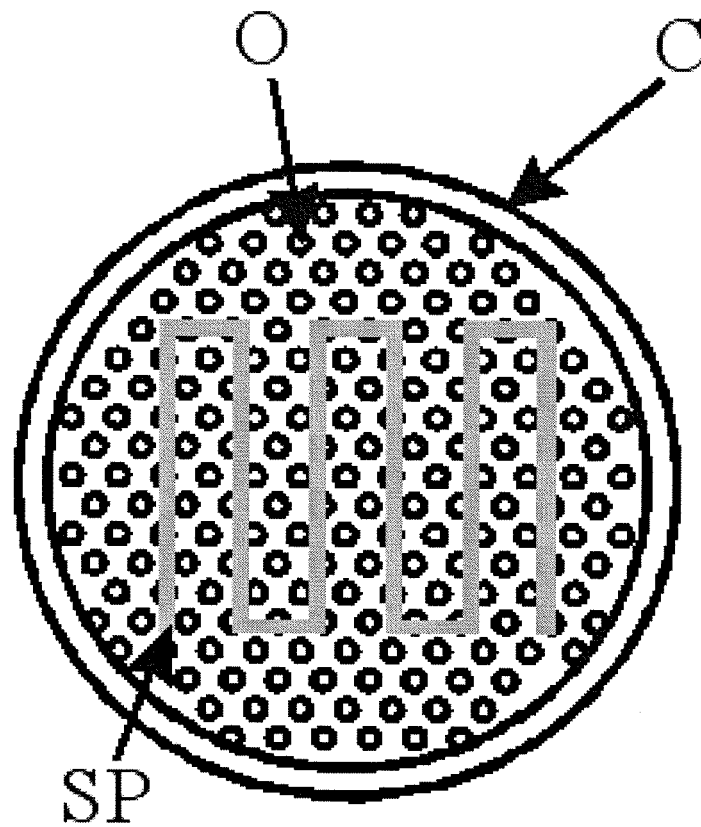


Figura 2

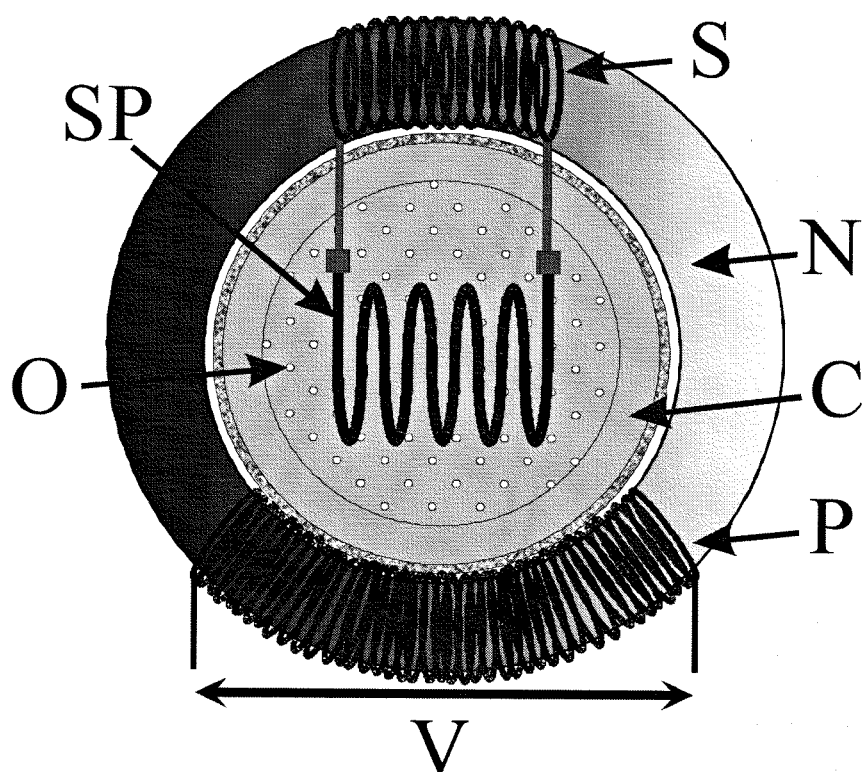


Figura 3

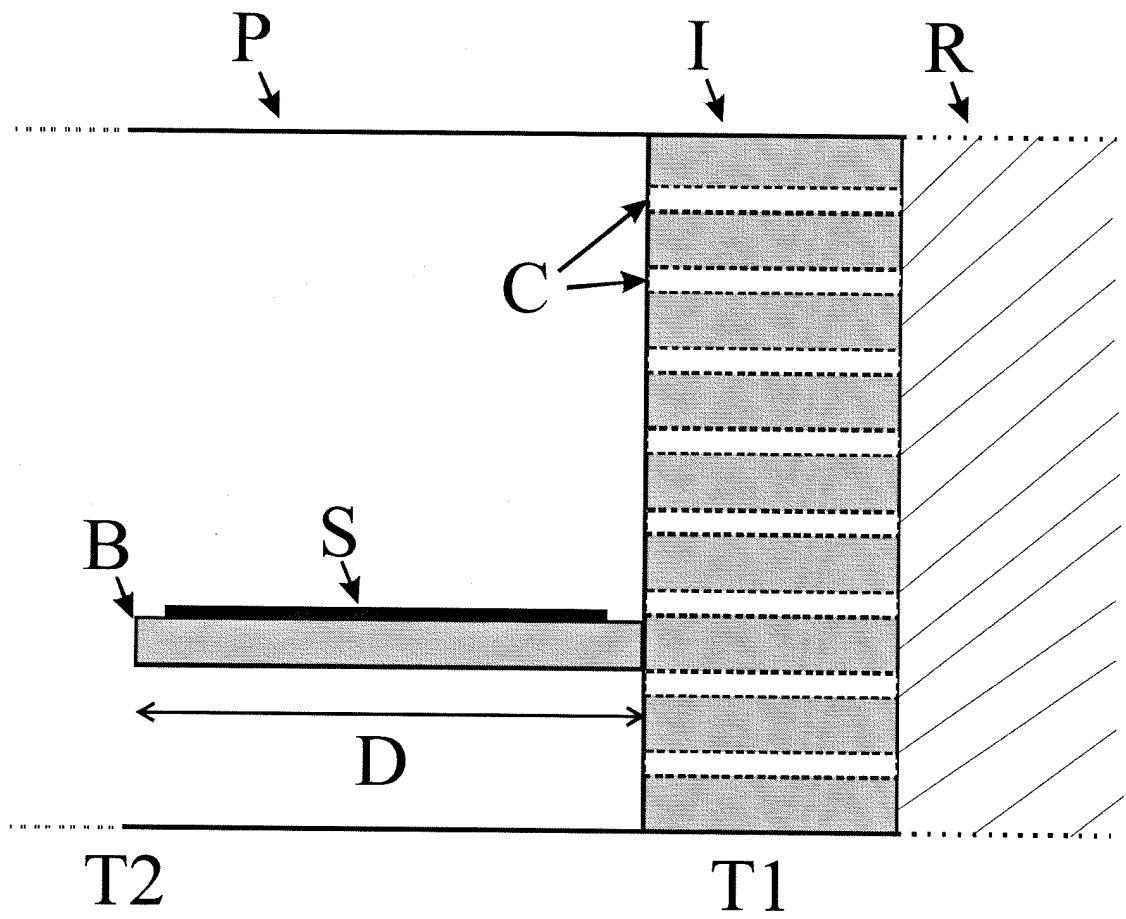


Figura 4

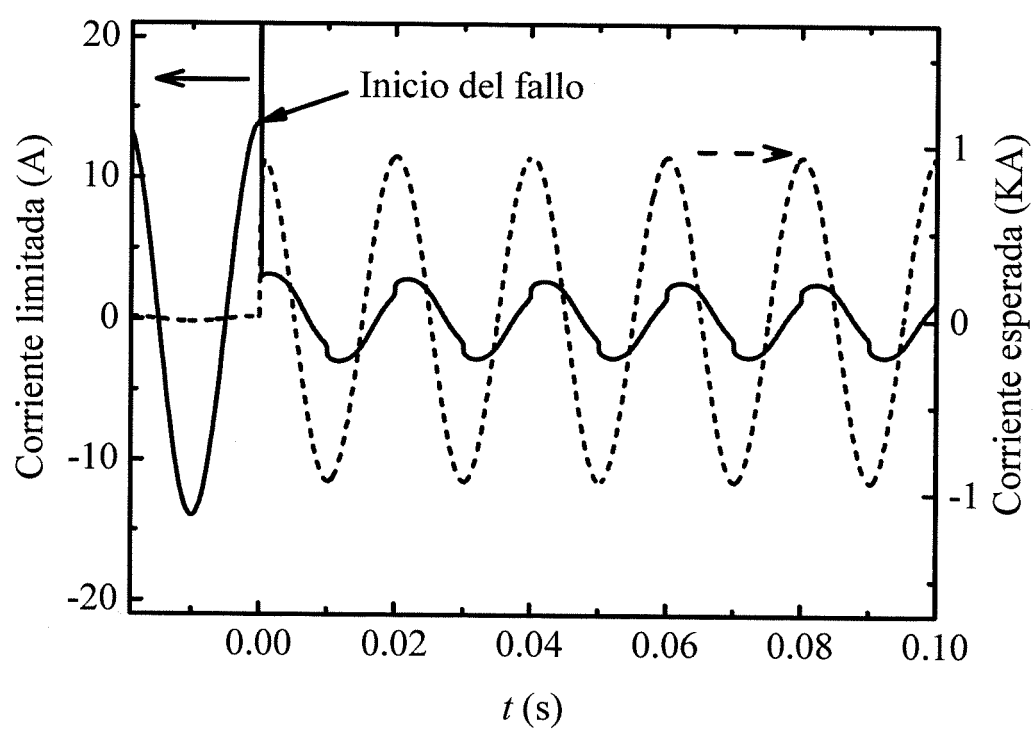


Figura 5. a

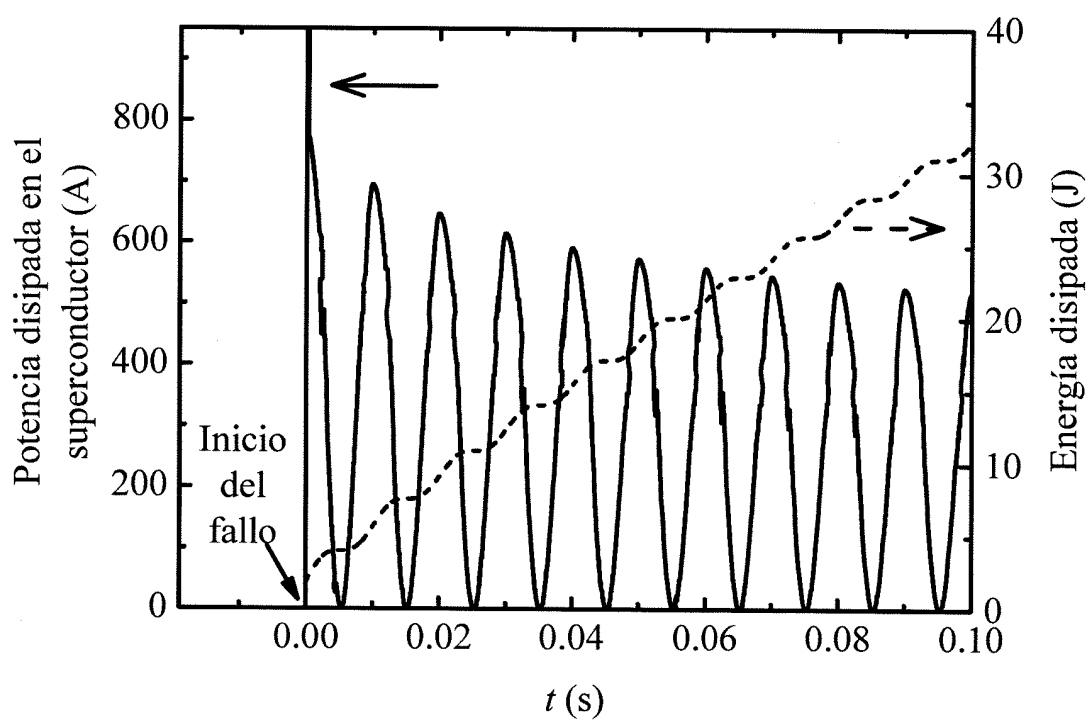


Figura 5. b

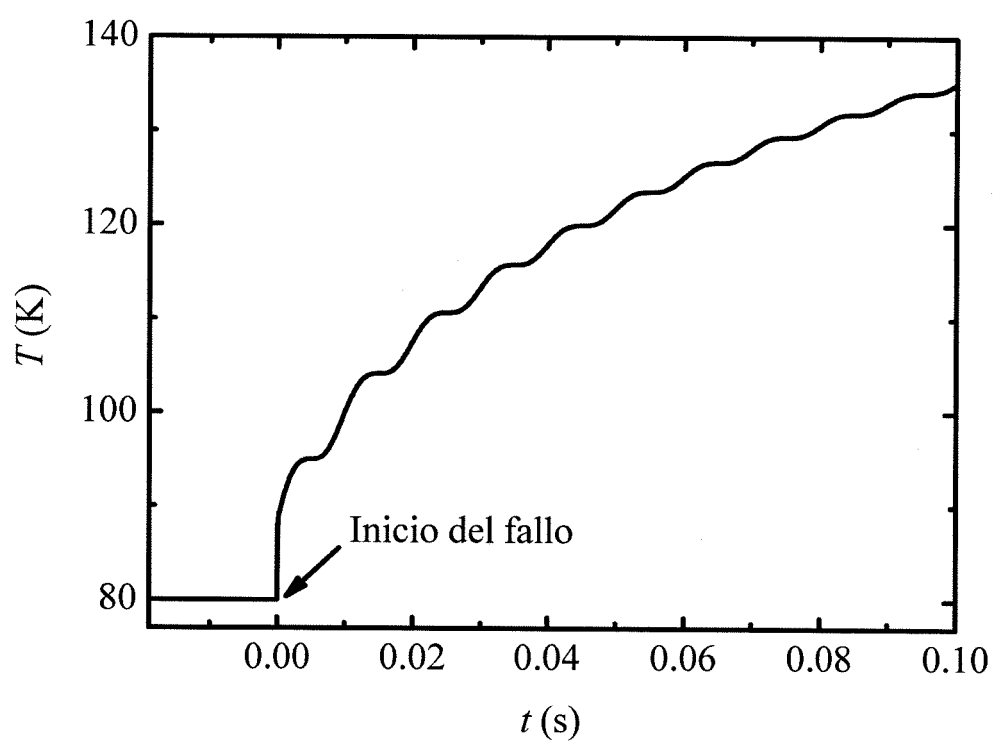


Figura 5. c



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ ES 2 334 616

⑫ Nº de solicitud: 200800298

⑬ Fecha de presentación de la solicitud: **04.02.2008**

⑭ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑮ Int. Cl.: **H01B 12/00** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑯ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
Y	US 20040123979 A1 (MING-SHAN JENG et al.) 01.07.2004, todo el documento.	1-5
Y	EP 0836262 A2 (OXFORD INSTRUMENTS PLC) 15.04.1998, todo el documento.	1-5
A	US 20050000233 A1 (ZHILI HAO, MARIETTA et al.) 06.01.2005, todo el documento.	1-5
A	US 20060266052 A1 (PEN YUAN HSING et al.) 30.11.2006, todo el documento.	1-5
A	ES 2240490 T3 (PIRELLI AND C.S.P.A.) 16.10.2005, todo el documento.	1-5
A	US 5901556 A (THOMAS J. HOFER) 11.05.1999, todo el Documento.	1-5
A	ES 2075843 T3 (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES) 16.10.1995, todo el documento.	1-5
A	ES 2168969 B1 (CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS) 01.11.2007, todo el documento.	1-5
A	ES 2265749 B2 (UNIVERSIDAD SANTIAGO DE COMPOSTELA) 16.07.2007, todo el documento.	1-5

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

26.02.2010

Examinador

G. Foncillas Garrido

Página

1/5

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H01B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 26.02.2010

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones	1-5	SÍ
	Reivindicaciones		NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones		SÍ
	Reivindicaciones	1-5	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de **aplicación industrial**. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión:

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como ha sido publicada.

1. Documentos considerados:

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	US 20040123979 A1	01-07-2004
D02	EP 0836262 A2	15-04-1998

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

El objeto de la invención combina las características de un material superconductor al paso de corriente con las propiedades de un intercambiador de un refrigerador termoacústico.

El estado de la técnica se basa en las propiedades que los materiales superconductores presentan frente a corrientes eléctricas en base a poseer una resistencia fuertemente no lineal y dependiente de varias magnitudes como son la temperatura, los valores de la corriente que circula por ellos y el campo magnético al que se hallen sometidos.

Reivindicaciones 1

El documento del estado de la técnica que se considera mas próximo al objeto de la invención es el Documento D01, dicho Documento presenta un sistema de refrigeración basado en un aparato termoacoustico básico (Figura 3), el intercambio de calor se produce entre el líquido de tubo de resonancia (10) y el de un tubo (80) (figura 6) ambos dispuestos de forma transversal, de esta forma se consigue realizar directamente el intercambio de calor en el sistema sin necesidad de incluir elementos intermedios o cavidades.

Es sobradamente conocido (como así se pone además de manifiesto en la solicitud) la problemática que presentan los superconductores a someterse altas temperatura y por tanto se ha estudiado ampliamente como poder refrigerarlos bajo fluidos, destacando líquidos criogénicos como son el helio o el nitrógeno.

La diferencia entre el objeto de la invención y D01 se centra en la refrigeración de un superconductor que actúa como limitador de corriente, en lugar de un tubo por donde circula un fluido.

En D02, se presenta (figura 4) un sistema de refrigeración (30) donde el superconductor (1) se refrigera bajo gas (helio) de forma que pueda disminuir la temperatura del superconductor por debajo de temperatura crítica del mismo.

Se considera que un experto en la materia, en base a la combinación de dichos documentos llegaría al objeto de la invención presentado en la solicitud, es decir, utilizar un refrigerador termoacústico para refrigerar un superconductor y además para una mayor eficiencia, disponer dicho superconductor en las caras del intercambiador de calor del refrigerador de forma que cuando se produjera un aumento en la temperatura de mismo, el refrigerador termoacústico actuara de forma directa sobre el superconductor sin utilizar cavidades.

Dicha reivindicación se considera nueva (Artículo 6 LP) y carecen de actividad inventiva (Artículo 8 LP)

Hoja adicional

Reivindicaciones 2-5

La consideración de un elemento superconductor de tipo masivo (granular o monodominio), o formando una película delgada o un hilo delgado superconductor, así como que dicho elemento superconductor se adhiere sobre la superficie del intercambiador mediante una sustancia que sea una buena conductora del calor, no se considera que produzca un efecto técnico dado que establece aspectos de conocimiento común en el estado de la técnica que nos ocupa.

Por otro lado, disponer o establecer dicho elemento superconductor de forma que no evite el paso del gas a través de los canales del intercambiador de calor, si bien no se indica en D02, se deduce de forma evidente en base al fin que se persigue (0025-0026).

Dichas reivindicaciones se consideran nuevas (Artículo 6 LP) y carecen Actividad inventiva (Artículo 8 LP)