

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 945 579**

51 Int. Cl.:

**H01L 39/20** (2006.01)

**H01L 39/18** (2006.01)

**H01F 6/04** (2006.01)

**G01R 33/3815** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.02.2020** **E 20160145 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.02.2023** **EP 3703142**

54 Título: **Sistemas y procedimientos para enfriar un conmutador superconductor usando vías de enfriamiento dobles**

30 Prioridad:

**28.02.2019 US 201916289182**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**04.07.2023**

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)**

**1 River Road**

**Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**MINE, SUSUMU;**

**BAI, YE;**

**WU, ANBO;**

**XU, MINFENG y**

**THOMPSON, PAUL ST. MARK SHADFORTH**

74 Agente/Representante:

**DE ROOIJ, Mathieu Julien**

ES 2 945 579 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Sistemas y procedimientos para enfriar un conmutador superconductor usando vías de enfriamiento dobles

5 **Antecedentes**

[0001] La divulgación se refiere en general a sistemas superconductores y, más específicamente, a sistemas y procedimientos para enfriar un conmutador de corriente persistente cuando funciona entre un modo resistivo y un modo superconductor en un entorno criogénico.

[0002] Los imanes superconductores se usan en diversos aparatos tales como, pero sin limitarse a, generadores y motores eléctricos superconductores, sistemas de imágenes por resonancia magnética (IRM) para diagnóstico médico, dispositivos de levitación magnética para el transporte en tren y fusión nuclear.

[0003] Se usa un imán superconductor para producir un campo magnético en el aparato superconductor. En algunos procedimientos, se aplica constantemente una corriente eléctrica desde una fuente de alimentación al imán superconductor para producir el campo magnético. Sin embargo, la producción de un campo magnético fuerte de este tipo implica un suministro constante de corriente eléctrica en un intervalo de cientos de amperios. Este suministro constante de corriente eléctrica al imán superconductor incrementa el coste de funcionamiento del aparato superconductor.

[0004] Por otro lado, en otras técnicas determinadas, el imán superconductor se excita para funcionar en un modo de corriente persistente, donde la corriente eléctrica fluye persistentemente en un bucle superconductor sin ningún suministro de corriente desde la fuente de alimentación. Inicialmente, se usa una fuente de alimentación externa para activar el campo magnético de una o más bobinas superconductoras eléctricamente conductoras. Después de que se obtiene el campo magnético deseado y se desconecta la fuente de alimentación del imán, el imán mantiene la corriente y el campo magnético por un conmutador de corriente persistente, que está acoplado en paralelo al imán superconductor y la fuente de alimentación. El conmutador de corriente persistente se conmuta de forma alternativa de un estado normal a un estado superconductor para hacer funcionar el imán superconductor en el modo de corriente persistente. Estas técnicas se usan ampliamente en dispositivos magnéticos, tales como generadores eléctricos superconductores, motores y sistemas de IRM. Sin embargo, mientras se hace funcionar el conmutador de corriente persistente en el estado normal, se produce una cantidad de calor en el conmutador de corriente persistente. Es deseable disipar de forma óptima este calor del conmutador de corriente persistente para hacer pasar el conmutador del estado normal al estado superconductor sin una alta vaporización del criógeno en el sistema superconductor.

[0005] En un sistema convencional, un imán superconductor se aloja en un recipiente de helio que contiene aproximadamente 2000 litros de helio (He) líquido. Además, el conmutador de corriente persistente se ajusta alrededor del imán superconductor con el conmutador de corriente persistente sumergido en este recipiente de helio. Puesto que esta disposición emplea un recipiente grande con miles de litros de He líquido, la disposición no solo es costosa de fabricar, sino también pesada de transportar e instalar en una ubicación deseada, por ejemplo, centros de diagnóstico. Adicionalmente, la recarga de miles de litros de He líquido para su entrega en ubicaciones remotas después de completar el viaje hasta el cliente puede ser un inconveniente.

[0006] Además, el He líquido en estos sistemas a veces se puede vaporizar durante un acontecimiento de extinción. El helio vaporizado se escapa del baño criogénico en el que están sumergidas las bobinas magnéticas. Por tanto, cada acontecimiento de extinción va seguido del rellenado del He líquido y la nueva rampa del imán, lo que es un acontecimiento costoso y que requiere mucho tiempo.

[0007] Por otra parte, el sistema de imanes de enfriamiento por conducción necesita menos inventario de helio que el sistema convencional. Sin embargo, cuando el cuerpo de conmutador de corriente persistente está en un estado APAGADO (estado normal), la temperatura diseñada es alta y, por tanto, el tiempo de enfriamiento desde el estado APAGADO hasta el estado ENCENDIDO (estado superconductor) se vuelve más largo. Este largo tiempo de enfriamiento no es preferente para el funcionamiento del sistema. Para reducir el tiempo de enfriamiento, se puede incrementar la conductancia de la vía de conducción de calor; sin embargo, esto conducirá un calor excesivo al depósito criogénico cuando el conmutador esté en el estado APAGADO (y a mayor temperatura) para la rampa de bobina superconductora. Durante el aumento gradual (*ramp-up*) de la bobina superconductora, la conducción de calor excesivo del conmutador de corriente persistente puede consumir todo el criógeno líquido almacenado (por ejemplo, helio líquido) antes de completar el aumento gradual.

[0008] En consecuencia, existe la necesidad de un conmutador superconductor y un procedimiento de enfriamiento que proporcione una tasa incrementada de enfriamiento del conmutador, una fiabilidad de sistema incrementada y reduzca la inestabilidad térmica del sistema.

[0009] Los documentos US 2016/276082 A1, US 2013/160975 A1, US 2006/135370 A1, US2016/0189842 A1, US 2016/0187435 A1 y JP 2004 235653 A se refieren a sistemas de enfriamiento de imanes superconductores.

## Breve descripción

**[0010]** Los aspectos y ventajas de la divulgación se exponen a continuación en la siguiente descripción, o pueden ser obvios a partir de la descripción, o se pueden aprender a través de la práctica de la divulgación.

**[0011]** La presente invención define un sistema de conmutación de corriente persistente ("persistent current switch system") de acuerdo con la reivindicación de dispositivo 1 independiente y un procedimiento para enfriar una unidad de devanado superconductora de acuerdo con la reivindicación de procedimiento 13 independiente.

**[0012]** Estos y otros rasgos característicos, aspectos y ventajas de la presente divulgación se entenderán mejor con referencia a la siguiente descripción y reivindicaciones adjuntas. Los dibujos adjuntos, que se incorporan en, y constituyen una parte de, esta memoria descriptiva, ilustran modos de realización de la divulgación y, conjuntamente con la descripción, sirven para explicar los principios de la divulgación.

## Breve descripción de los dibujos

**[0013]** Una divulgación suficiente y completa de la presente divulgación, incluyendo el mejor modo de la misma para un experto en la técnica, se expone más en particular en el resto de la memoria descriptiva, incluyendo la referencia a las figuras adjuntas, en las que:

la FIG. 1 es una vista lateral en sección transversal esquemática de un sistema de conmutación de corriente persistente que incluye vías de enfriamiento dobles, de acuerdo con uno o más modos de realización de la presente divulgación;

la FIG. 2 es una vista lateral en sección transversal esquemática de un sistema de conmutación de corriente persistente que incluye vías de enfriamiento dobles, de acuerdo con uno o más modos de realización de la presente divulgación;

la FIG. 3 es una vista lateral en sección transversal esquemática de un sistema de conmutación de corriente persistente que incluye vías de enfriamiento dobles, de acuerdo con uno o más modos de realización de la presente divulgación;

la FIG. 4 es una comparación gráfica de un sistema de enfriamiento de conmutación de corriente persistente que utiliza una vía de enfriamiento sólida frente a un sistema de conmutación de corriente persistente que utiliza vías de enfriamiento dobles de acuerdo con uno o más modos de realización de la presente divulgación; y

la FIG. 5 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para conmutar de forma alternativa el conmutador de corriente persistente que incluye vías de enfriamiento dobles entre un primer modo o estado normal y un segundo modo o estado superconductor, de acuerdo con uno o más modos de realización de la presente divulgación.

**[0014]** Los números de referencia correspondientes indican partes correspondientes en todas las varias vistas de los dibujos.

## Descripción detallada de la divulgación

**[0015]** A continuación se describirán uno o más modos de realización específicos de la presente divulgación. En un esfuerzo por proporcionar una descripción concisa de estos modos de realización, es posible que todos los rasgos característicos de una implementación real no se describan en la memoria descriptiva. Se debe apreciar que en el desarrollo de cualquiera implementación real, como en cualquier proyecto de ingeniería o diseño, se deben tomar numerosas decisiones específicas de implementación para lograr los objetivos específicos de los desarrolladores, tales como el cumplimiento de las restricciones relacionadas con el sistema y relacionadas con el negocio, que puede variar de una implementación a otra. Además, se debe apreciar que un esfuerzo de desarrollo de este tipo podría ser complejo y requerir mucho tiempo, pero no obstante sería una tarea rutinaria de diseño, fabricación y manufactura para los expertos en la técnica que tienen el beneficio de esta divulgación.

**[0016]** Cuando se presentan elementos de diversos modos de realización de la presente invención, los artículos "un/a", "el/la", "los/las" y "dicho(s)/a(s)" pretenden indicar que hay uno o más de los elementos. Los términos "que comprende(n)", "que incluye(n)" y "que tiene(n)" pretenden ser inclusivos y quieren decir que puede haber elementos adicionales distintos de los elementos enumerados.

**[0017]** Los modos de realización de la presente divulgación proporcionan un conmutador superconductor que tiene una tasa de enfriamiento incrementada. En particular, los modos de realización de la presente divulgación proporcionan un sistema de conmutación superconductor y, más en particular, un conmutador de corriente

persistente que utiliza vías de enfriamiento dobles para proporcionar una tasa de enfriamiento incrementada del conmutador de corriente persistente.

**[0018]** Aunque los modos de realización de ejemplo de la presente divulgación se describirán en general en el contexto de generadores y motores superconductores, para propósitos ilustrativos, un experto en la técnica apreciará fácilmente que los modos de realización de la presente divulgación se pueden usar en combinación con cualquier componente para calentamiento y/o enfriamiento, tal como los asociados con escáneres de TAC, sistema de IRM o similares, y no pretende limitarse a una implementación de enfriamiento con componentes superconductores.

**[0019]** Como se describirá en detalle más adelante en el presente documento, se presentan diversos modos de realización de un sistema de conmutación de corriente persistente de ejemplo que incluye vías de enfriamiento dobles y procedimientos para enfriar el conmutador de corriente persistente para conmutar de forma alternativa entre un primer modo y un segundo modo. Empleando los procedimientos y los diversos modos de realización del conmutador de corriente persistente y el sistema de conmutación descritos más adelante en el presente documento, el tamaño de los dispositivos magnéticos, el coste de fabricación, el coste de instalación, el tiempo de enfriamiento para lograr la conmutación y el coste de hacer funcionar los dispositivos magnéticos se pueden reducir sustancialmente.

**[0020]** Volviendo ahora a los dibujos, y en referencia a la FIG. 1, se representa una vista lateral en sección transversal de un sistema de conmutación de corriente persistente 10, de acuerdo con aspectos de la presente técnica. El sistema de conmutación de corriente persistente 10 se puede configurar para conmutar de forma alternativa entre un primer modo y un segundo modo. El primer modo puede ser representativo de un estado normal donde una unidad de devanado de conmutador de corriente persistente (descrita actualmente) proporciona una alta resistencia eléctrica. De forma similar, el segundo modo puede ser representativo de un estado superconductor donde la unidad de devanado de conmutador de corriente persistente proporciona una resistencia eléctrica nula. Cabe señalar que los términos "estado normal", "estado resistivo" y "primer modo" se usan de manera intercambiable y los términos "estado superconductor" y "segundo modo" se usan de manera intercambiable. El sistema de conmutación de corriente persistente 10 se emplea típicamente para hacer funcionar un imán superconductor 98 en un modo de corriente persistente.

**[0021]** En una configuración actualmente contemplada, el sistema de conmutación de corriente persistente 10 incluye una cámara de vacío 12, una unidad de devanado 14, también denominada en el presente documento "conmutador", vías de enfriamiento dobles 16 y un depósito 18. La cámara de vacío 12 se puede disponer como una unidad en un dispositivo magnético, tal como un generador o motor superconductor. La cámara de vacío 12 tiene definido en la misma un espacio de vacío 13. Cabe señalar que la implementación del sistema de conmutación de corriente persistente 10 no se limita a esta implementación, y se puede implementar en otros dispositivos, tales como otros tipos de máquinas eléctricas superconductoras, sistemas de almacenamiento de energía de imanes superconductores, sistemas de IRM y similares. En un modo de realización, la cámara/entorno de vacío puede existir ya en el sistema, y el imán y el sistema de conmutación de corriente persistente se pueden implementar en el entorno de vacío existente.

**[0022]** Durante el funcionamiento, y opcionalmente con la ayuda de un calentador (no mostrado), la temperatura de la unidad de devanado 14 se calienta por encima de una temperatura umbral. La temperatura umbral puede ser representativa de una temperatura de diseño crítica de la unidad de devanado 14, por encima de la que la unidad de devanado 14 pasa del estado superconductor al estado normal o resistivo.

**[0023]** En una configuración actualmente contemplada, el sistema de conmutación de corriente persistente 10 está configurado para conmutar de forma alternativa la unidad de devanado 14 entre el estado normal y el estado superconductor. En un modo de realización de ejemplo, la unidad de devanado 14 puede ser una estructura similar a alambre que se enrolla sobre la circunferencia exterior de una bobina, o similar. En un modo de realización, la unidad de devanado 14 se puede enrollar de forma bifilar sobre la bobina para minimizar la inductancia de la unidad de devanado 14.

**[0024]** La unidad de devanado 14 y las vías de enfriamiento dobles están dispuestas en la cámara de vacío 12, y más en particular dentro del espacio de vacío 13. Las vías de enfriamiento dobles 16 están configuradas para enfriar la unidad de devanado 14 por debajo de la temperatura umbral. Para proporcionar dicho enfriamiento, las vías de enfriamiento dobles 16 se acoplan térmicamente a la unidad de devanado 14 y configuran para enfriar la temperatura de la unidad de devanado 14 por debajo de la temperatura umbral ( $T_c$ ) para hacer pasar la unidad de devanado 14 del primer modo al segundo modo. Las vías de enfriamiento dobles 16 están compuestas de una primera vía de enfriamiento 20 y una segunda vía de enfriamiento 22. La primera vía de enfriamiento 20 está configurada como una vía de enfriamiento sólida, en la que un componente térmico sólido 24 está acoplado térmicamente tanto a la unidad de devanado 14 como a un tubo refrigerante 26. Más en particular, el componente térmico sólido 24 está en contacto directo tanto con la unidad de devanado 14 como con un tubo refrigerante 26. En un modo de realización, un primer extremo 23 del componente térmico sólido 24 está en contacto directo con la unidad de devanado 14 y un segundo extremo opuesto 25 del componente térmico sólido

24 está en contacto directo con el tubo refrigerante 26. La segunda vía de enfriamiento 22, a diferencia de la primera vía de enfriamiento 20, no emplea un componente térmico sólido, y está configurada como una vía de enfriamiento de tubo que proporciona el tubo refrigerante 26 para acoplarse térmicamente a la unidad de devanado 14, y más en particular, el tubo refrigerante 26 para estar en contacto directo con la unidad de devanado 14.

**[0025]** Durante el proceso de enfriamiento del conmutador (descrito actualmente), el tubo refrigerante 26 está configurado para hacer circular un refrigerante 28 en el mismo. El refrigerante 28 puede incluir helio líquido (LHe), hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>), neón líquido (LNe) o nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>). En un modo de realización, la unidad de devanado 14 puede ser un superconductor de baja temperatura, un superconductor de temperatura media o un superconductor de alta temperatura. Además, el refrigerante se puede seleccionar en base al tipo de superconductor usado para la unidad de devanado 14. Por ejemplo, el sistema de conmutación de corriente persistente que tiene un superconductor de baja temperatura puede emplear helio líquido (LHe) como refrigerante. De forma similar, para un superconductor de temperatura media, se puede usar LHe, neón líquido (LNe) o hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>) como refrigerante. Además, para un superconductor de alta temperatura, se puede usar LNe o nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>) como refrigerante en el sistema.

**[0026]** Como se indica previamente, en un modo de realización de ejemplo, las vías de enfriamiento dobles 16 están configuradas para reducir la temperatura de la unidad de devanado 14 por debajo de la temperatura umbral, a una velocidad acelerada que es más rápida que la velocidad a la que se logra el enfriamiento usando solo una única vía de enfriamiento. De acuerdo con un modo de realización, el componente térmico sólido 24 de la primera vía de enfriamiento 20 puede ser cualquier componente térmicamente conductor, tal como una lámina, varilla o barra de metal. En un modo de realización, el componente térmico sólido 24 puede ser una lámina, varilla o barra de latón, aluminio y/o cobre, por ejemplo. Como se describe previamente, el componente térmico sólido 24 está en contacto directo con la unidad de devanado 14 y el tubo refrigerante 26. El componente térmico sólido 25 proporciona la conducción de calor desde la unidad de devanado 14 al refrigerante 28 en el tubo refrigerante 26. Como se describe previamente, la unidad de devanado 14 está en contacto directo con el tubo refrigerante 26 y proporciona la conducción de calor desde la unidad de devanado 14 al refrigerante 28 en el tubo refrigerante 26.

**[0027]** El tubo refrigerante 26 puede incluir una entrada 30 en un extremo y una salida 32 en el otro extremo del tubo refrigerante 26. Además, la entrada 30 está operativamente acoplada a una salida 34 del depósito 18. Cabe señalar que los términos "depósito" y "depósito de refrigerante" se pueden usar de manera intercambiable. La entrada 30 está configurada para recibir el refrigerante 28 desde el depósito 18. El tubo refrigerante 26 define un canal 36 en el mismo que acopla operativamente el tubo refrigerante 26 y el depósito 18 para transportar el refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del tubo refrigerante 26 para enfriar la unidad de devanado 14. Un componente de control de flujo 38 está dispuesto a lo largo del tubo refrigerante 26 para regular el flujo de refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del tubo refrigerante 26. En un modo de realización, el componente de control de flujo 40 es una válvula criogénica 40, tal como una válvula biestable ("latching valve"), que puede controlar el flujo de refrigerante 28 dentro del tubo refrigerante 26 y, por tanto, la tasa de retirada de calor de la unidad de devanado 14. En un modo de realización, la válvula criogénica 40 no genera calor excepto calor momentáneo durante el cambio de estado de la válvula entre un estado abierto y cerrado y viceversa. En un modo de realización, la entrada 30 del tubo refrigerante 26 está configurada para recibir el refrigerante 28 desde el depósito 18 cuando la unidad de devanado 14 está ENCENDIDA (estado superconductor). El depósito 18 también se puede denominar unidad de almacenamiento para almacenar y/o condensar el refrigerante 28. En determinados modos de realización, el depósito 18 puede incluir una válvula de descarga (no mostrada). La válvula de descarga se puede configurar para ayudar a controlar cualquier acumulación de presión dentro del depósito 18. La válvula de descarga se puede configurar para liberar automática y/o manualmente cualquier acumulación de presión dentro del depósito 18.

**[0028]** De manera similar, el tubo refrigerante 26 está acoplado operativamente a una entrada 44 de un recondensador 46 y está configurado para transportar el refrigerante evaporado 28 desde el tubo refrigerante 26 al depósito 18. En el modo de realización ilustrado, el recondensador 46 está acoplado a un enfriador criogénico 48. Una salida 52 del recondensador está acoplada al depósito 18. La salida 32 del tubo refrigerante 26 está configurada para transportar el refrigerante evaporado 28 desde el tubo refrigerante 26 al depósito 18, por medio del recondensador 46, cuando la unidad de devanado 14 está APAGADA (estado normal).

**[0029]** El conmutador superconductor (SC), y más en particular, la unidad de devanado 14, típicamente funciona a una temperatura muy por encima de la temperatura crítica, por ejemplo, 50 K-60 K, en un estado resistivo durante un proceso de rampa de imán. Después de que el imán se energiza a plena corriente y se abre el componente de control de flujo 38, la unidad de devanado 14 se enfría (a un estado superconductor). Durante este proceso de enfriamiento, el refrigerante 28 se vaporizará y calentará antes de regresar al depósito del enfriador criogénico 18. Para minimizar el efecto potencial del refrigerante calentado 28 en el tubo refrigerante 26 y la unidad de devanado 14, una masa de protección ("buffer mass") opcional (tal como un bloque de cobre, material compuesto de cobre y resina epoxídica, o similares) 50 y/o un depósito intermedio ("buffer tank") de gas evaporado 56 opcional está fijado térmicamente a la vía de retorno del tubo refrigerante 26, para enfriar el

refrigerante evaporado 28 y reducir su impacto en el sistema de enfriamiento global. En el modo de realización de la FIG. 1, la masa de protección 50 opcional está dispuesta entre la unidad de devanado 14 y el recondensador 46, para evitar que el recondensador 46 se caliente de forma demasiado rápida cuando el componente de control de flujo 38 se abre para el enfriamiento del conmutador. En otro modo de realización, el gas de retorno, y más en particular, el refrigerante evaporado 28, se puede introducir al depósito intermedio de gas evaporado 56 dispuesto entre la unidad de devanado 14 y el recondensador 46.

**[0030]** Como se señala previamente, en un sistema enfriado por baño convencional, el conmutador de corriente persistente típicamente está sumergido en el recipiente de refrigerante que contiene He líquido. Mientras se enfría el conmutador, el He líquido se evapora y se puede expulsar del sistema a un entorno externo. Además, para compensar este He líquido expulsado, el recipiente de refrigerante se vuelve a llenar con He líquido nuevo, lo que es un acontecimiento costoso y que requiere mucho tiempo. Además, esta disposición requiere litros de He líquido para volver a llenar el recipiente de refrigerante. Algunas o todas estas deficiencias de los conmutadores de corriente persistente actualmente disponibles se pueden evitar por medio del uso de modos de realización consecuentes con el sistema de conmutación de corriente persistente 10 de ejemplo que incorpora las vías de enfriamiento dobles 16 divulgadas.

**[0031]** De acuerdo con aspectos de la presente técnica, el refrigerante evaporado 28 desde el tubo refrigerante 26 se transporta al recondensador 46, donde el refrigerante evaporado 28 se vuelve a condensar y se transporta de nuevo al depósito 18 y finalmente al tubo refrigerante 26. Esta recondensación o recirculación del refrigerante evaporado 28 minimiza sustancialmente o en algunas situaciones elimina la necesidad de volver a llenar el depósito de refrigerante 18, lo que a su vez reduce el tamaño y el peso del depósito 18. Además, puesto que el refrigerante se vuelve a condensar y se usa de nuevo en el tubo refrigerante 26, se puede evitar el uso de litros de refrigerante en los sistemas. Esto a su vez reduce el coste de fabricación y el peso de los sistemas.

**[0032]** Cabe señalar que se supone que el sistema de conmutación de corriente persistente 10 está funcionando en el estado normal al principio. El estado normal es representativo de un estado donde la unidad de devanado 14 proporciona una alta resistencia eléctrica a un imán superconductor. Además, para hacer funcionar el sistema de conmutación de corriente persistente 10 en el estado normal, la temperatura de la unidad de devanado 14 se mantiene por encima de la temperatura umbral.

**[0033]** Para conmutar el sistema de conmutación de corriente persistente 10 del estado normal al estado superconductor, la unidad de devanado 14, y más en particular, una unidad de calentamiento asociada opcional (no mostrada), se desactiva o APAGA y el tubo refrigerante 26 se llena con el refrigerante 28 recibido desde el depósito 18. El refrigerante 28 circula en el tubo refrigerante 26 para mantener y/o reducir la temperatura de la unidad de devanado 14 por debajo de la temperatura umbral o la temperatura crítica por medio de la primera vía de enfriamiento 20 y la segunda vía de enfriamiento 22. Durante el proceso de enfriamiento, el tubo refrigerante 26 está en contacto térmico directo con el componente térmico sólido 24 y la unidad de devanado 14 y proporciona la absorción de calor de la unidad de devanado 14 por medio de las vías de enfriamiento dobles 16. Si la temperatura de la unidad de devanado 14 está por debajo de la temperatura umbral, la unidad de devanado 14 conmuta del estado normal al estado superconductor. Como se señala previamente, el estado superconductor puede ser representativo de un estado donde la unidad de devanado 14 proporciona una resistencia nula al imán superconductor. Esta resistencia nula de la unidad de devanado 14 ayuda a formar un bucle persistente con corriente eléctrica que circula entre la unidad de devanado 14 y el imán superconductor, sin ningún suministro de corriente adicional desde una fuente de alimentación (no mostrada en la FIG. 1). En un modo de realización, cuando el sistema de conmutación de corriente persistente 10 está funcionando en el estado superconductor, cabe señalar que la carga de calor externa en el sistema de conmutación de corriente persistente 10 es relativamente pequeña. La fuente de carga de calor externa puede incluir radiación térmica. Esta pequeña carga de calor se puede reducir además usando el aislamiento multicapa MLIexpand alrededor del sistema de conmutación de corriente persistente 10. En otro modo de realización, el sistema de conmutación de corriente persistente 10 puede ser una entidad independiente con su propio depósito y se puede colocar en cualquier lugar alrededor del imán superconductor en el espacio de vacío 13.

**[0034]** Típicamente, el sistema de conmutación de corriente persistente 10 funciona en el estado superconductor si la temperatura de la unidad de devanado 14 está por debajo de la temperatura umbral. De otro modo, el sistema de conmutación de corriente persistente 10 funciona en el estado normal. Para conmutar el sistema de conmutación de corriente persistente 10 del estado superconductor al estado normal, el componente de control de flujo 38 dispuesto de forma fluidica en el tubo refrigerante 26 se cierra. El componente de control de flujo 38 está diseñado para bloquear o ahogar el flujo del refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del tubo refrigerante 26, y también para evitar el reflujo del refrigerante 28 desde el tubo refrigerante 26 al depósito 18. Durante el funcionamiento o el calentamiento de la unidad de devanado 14, la temperatura de la unidad de devanado 14 se potencia o incrementa por encima de la temperatura umbral. Esta temperatura incrementada de la unidad de devanado 14 provoca que el sistema de conmutación de corriente persistente 10 pase del estado superconductor al estado normal.

**[0035]** Durante la transición del sistema de conmutación de corriente persistente 10, y más en particular, la unidad de devanado 14, al estado normal, el refrigerante evaporado 28 se transporta fuera del tubo refrigerante 26 por medio de la salida de tubo refrigerante 32 al depósito 18 por medio de la entrada 44 y una salida 52 del recondensador 46 y una entrada 54 del depósito. En un modo de realización, se puede emplear una diferencia de densidad del criógeno, tal como el refrigerante 28, para expulsar el refrigerante evaporado 28 del tubo refrigerante 26 al depósito 18 por medio del recondensador 46. Posteriormente a la recondensación en el recondensador 48, el refrigerante recondensado 28 se almacena en el depósito 18. Durante la conmutación del sistema de conmutación de corriente persistente 10, y más en particular, la unidad de devanado 14, del estado normal al estado superconductor, este refrigerante recondensado se hace circular de nuevo al tubo refrigerante 26.

**[0036]** Por tanto, empleando el sistema de conmutación de corriente persistente 10 de la FIG. 1, el refrigerante 28 en el tubo refrigerante 26 se utiliza eficazmente cuando se usa en sistemas con bajo volumen de criógeno en un entorno de vacío y proporciona enfriamiento adicional más allá de los sistemas que utilizan solo una única vía de enfriamiento, tal como un componente térmico sólido. Además, puesto que el sistema de conmutación de corriente persistente 10 tiene su propio entorno criogénico o sistema de enfriamiento de doble vía, el sistema de conmutación de corriente persistente 10 se puede usar como una entidad independiente. Más específicamente, el sistema de conmutación de corriente persistente 10 se puede colocar cercano al imán superconductor o se puede disponer de forma conveniente a una distancia del imán superconductor en una región de campo magnético bajo. El sistema de conmutación de corriente persistente 10 de ejemplo permite una mejora sobre el tiempo de respuesta de los sistemas conocidos, mientras que conmuta de forma alternativa entre el estado normal y el estado superconductor. El sistema de conmutación de corriente persistente 10 está configurado para conmutar del estado normal al estado superconductor dentro de un período de tiempo en un intervalo de aproximadamente 1 minuto a aproximadamente 15 minutos (véase la FIG. 4). En un modo de realización, el sistema de conmutación de corriente persistente 10, y más en particular, la unidad de devanado 14, se puede disponer en una posición horizontal, una posición vertical o una posición inclinada sobre el imán superconductor.

**[0037]** En referencia a la FIG. 2, se representa una vista en sección transversal de un sistema de conmutación de corriente persistente 60, de acuerdo con otro modo de realización de la presente técnica. El modo de realización de la FIG. 2 es similar al modo de realización de la FIG. 1, excepto que el dispositivo de control de flujo 38 está configurado como un limitador de flujo de orificio ("orifice flow restrictor") 62 dispuesto en comunicación fluida con el tubo refrigerante 26 para regular el flujo de refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del tubo refrigerante 26. Además, el dispositivo de control de flujo 38 está dispuesto en el tubo refrigerante 26 entre la unidad de devanado 14 y el recondensador 46. Además, como se mencionó previamente, el depósito también puede incluir una válvula de descarga 64 que se usa para liberar cualquier presión que se acumule dentro del depósito 18. En el modo de realización representado en la FIG. 2, el limitador de flujo de orificio 62 sirve como un limitador de flujo dentro del tubo refrigerante 26 para el refrigerante 28 que fluye a través del mismo. Se debe entender que en el presente documento se prevén tipos alternativos de componentes de control de flujo más allá de la válvula biestable criogénica y el limitador de flujo de orificio, tales como, pero sin limitarse a válvulas criogénicas de vástago largo.

**[0038]** En una configuración actualmente contemplada, el sistema de conmutación de corriente persistente 60 incluye una cámara de vacío 12, una unidad de devanado 14, un depósito 18 y vías de enfriamiento dobles 16. Las vías de enfriamiento dobles 16, compuestas de una primera vía de enfriamiento 20 y una segunda vía de enfriamiento 22, están configuradas para reducir la temperatura de la unidad de devanado 14 por debajo de una temperatura umbral, como se describe previamente. El tubo refrigerante 26 incluye una entrada 30 y una salida 32. La entrada 30 está configurada para recibir un refrigerante 28 del depósito 18 por medio de un canal 36 definido dentro del tubo refrigerante 26, y la salida 32 está configurada para transportar el refrigerante evaporado desde el tubo refrigerante 26 al depósito 18. Además, el componente de control de flujo 38 está dispuesto en comunicación fluida con el canal 36 para regular el flujo de refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del tubo refrigerante 26.

**[0039]** De acuerdo con aspectos de la presente técnica, el sistema de conmutación de corriente persistente 60, y más en particular, la unidad de devanado 14, está configurado para conmutar de forma alternativa entre un estado normal y un estado superconductor. Como se describe previamente con referencia a la FIG. 1, empleando el sistema de conmutación de corriente persistente 60 de la FIG. 2, el refrigerante 28 en el tubo refrigerante 26 se utiliza eficazmente cuando se usa en sistemas con bajo volumen de criógeno en un entorno de vacío y proporciona enfriamiento adicional más allá de los sistemas que utilizan solo una única vía de enfriamiento, tal como un componente térmico sólido.

**[0040]** Volviendo ahora a la FIG. 3, se representa una vista lateral en sección transversal de un sistema de conmutación de corriente persistente 70, de acuerdo con aún otro modo de realización de la presente técnica. El modo de realización de la FIG. 3 es similar al modo de realización de la FIG. 1, excepto que las vías de enfriamiento dobles 16 de la FIG. 1 emplean un componente térmico sólido 24 de la primera vía de enfriamiento 20 acoplado al mismo tubo refrigerante 26 de la segunda vía de enfriamiento 22, en el modo de realización de la FIG. 3, un primer tubo refrigerante 72 está en contacto directo con un componente térmico sólido 24 para la

retirada del calor de la unidad de devanado 14, y un segundo tubo refrigerante 74 se sitúa en contacto directo con la unidad de devanado 14 y proporciona la retirada de calor de la unidad de devanado 14. Un refrigerante 28 fluye a través de un canal formado en cada uno de los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74. Cabe señalar en el modo de realización de la FIG. 3, el refrigerante 28 en el primer tubo refrigerante 72 sale por una salida 78 hacia el segundo tubo refrigerante 74 antes de llegar al recondensador 46. En un modo de realización alternativo, el refrigerante 28 en el primer tubo refrigerante 72 puede salir por la salida 78 directamente hacia una entrada (no mostrada) del recondensador 46.

**[0041]** Además, el sistema de conmutación de corriente persistente 70 también incluye una unidad de devanado 14 y un depósito 18, que están dispuestos y funcionan de una manera que es sustancialmente similar al sistema de conmutación de corriente persistente 10 de la FIG. 1.

**[0042]** De forma similar a los modos de realización divulgados previamente, las vías de enfriamiento dobles 16 están configuradas para reducir la temperatura de la unidad de devanado 14 por debajo de la temperatura umbral en un período de tiempo más corto que con el uso de una única vía de enfriamiento. De acuerdo con un modo de realización, el componente térmico sólido 24 de la primera vía de enfriamiento 20 puede ser cualquier componente térmicamente conductor, tal como una lámina, varilla o barra de metal. El componente térmico sólido 24 puede ser una lámina, varilla o barra de latón, aluminio y/o cobre, por ejemplo. El componente térmico sólido 24 está en contacto directo con la unidad de devanado 14 y el primer tubo refrigerante 72. El componente térmico sólido 25 proporciona la conducción de calor desde la unidad de devanado 14 al refrigerante 28 en el primer tubo refrigerante 72.

**[0043]** El primer tubo refrigerante 72 puede incluir una entrada 76 en un extremo y la salida 78 en el otro extremo del tubo refrigerante 72. Además, la entrada 76 está operativamente acoplada a una salida 80 del depósito 18. La entrada 76 está configurada para recibir el refrigerante 28 desde el depósito 18. El primer tubo refrigerante 72 define un canal 82 en el mismo que acopla operativamente el primer tubo refrigerante 72 y el depósito 18 para transportar el refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del primer tubo refrigerante 72 para enfriar la unidad de devanado 14 por medio del componente térmico sólido 24.

**[0044]** El segundo tubo refrigerante 74 se sitúa en contacto directo con la unidad de devanado 14 y proporciona la retirada de calor de la unidad de devanado 14. El segundo tubo refrigerante 74 puede incluir una entrada 84 en un extremo y una salida 86 en el otro extremo del segundo tubo refrigerante 74. Además, la entrada 84 está operativamente acoplada a una salida 88 del depósito 18. La entrada 84 está configurada para recibir el refrigerante 28 desde el depósito 18. El segundo tubo refrigerante 74 define un canal 90 en el mismo que acopla operativamente el segundo tubo refrigerante 74 y el depósito 18 para transportar el refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del segundo tubo refrigerante 74 para enfriar la unidad de devanado 14.

**[0045]** Un componente de control de flujo 38 está dispuesto a lo largo del segundo tubo refrigerante 74 para regular el flujo de refrigerante 28 desde el depósito 18 a través del segundo tubo refrigerante 74. En un modo de realización, el componente de control de flujo 38 es una válvula criogénica 40 que puede controlar el flujo de refrigerante 28 dentro del segundo tubo refrigerante 74 y, por tanto, la tasa de retirada de calor de la unidad de devanado 14. En un modo de realización alternativo, se pueden disponer uno o más componentes de control de flujo adicionales en comunicación fluida con el primer tubo refrigerante 72 para controlar el flujo del refrigerante 28 a través del mismo.

**[0046]** En un modo de realización, las entradas 76, 84 de los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74, respectivamente, están configuradas para recibir el refrigerante 28 del depósito 18 cuando el sistema de conmutación de corriente persistente 70 está desactivado o APAGADO (estado superconductor).

**[0047]** Los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74 están acoplados operativamente a una entrada 44 de un recondensador 46 y están configurados para transportar el refrigerante evaporado 28 desde los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74 al depósito 18. En el modo de realización ilustrado, el recondensador 46 está acoplado a un enfriador criogénico 48. Las salidas 78, 86 de los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74, respectivamente, están configuradas para transportar el refrigerante evaporado 28 desde un tubo refrigerante 72, 74 respectivo al depósito 18 cuando el sistema de conmutación de corriente persistente 70, y más en particular, la unidad de devanado 14, está energizado o ENCENDIDO.

**[0048]** Además, de acuerdo con aspectos de la presente técnica, la unidad de devanado 14 está configurada para conmutar de forma alternativa el sistema de conmutación de corriente persistente 70 entre un estado normal y un estado superconductor. El refrigerante 28 en los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74 absorbe el calor generado por la unidad de devanado 14. Como consecuencia de la absorción del calor por el refrigerante 28, la unidad de devanado 14 se enfría y la temperatura de la unidad de devanado 14 cae por debajo de la temperatura umbral. Esta caída de temperatura ayuda a conmutar la unidad de devanado 14 del estado normal al estado superconductor. Como se describe previamente con referencia a la FIG. 1, empleando el sistema de conmutación de corriente persistente 70 de la FIG. 3, el refrigerante 28 en los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74 se utiliza eficazmente cuando se usa en sistemas con un volumen bajo de criógeno en un

entorno de vacío y proporciona un enfriamiento más rápido y adicional más allá de los sistemas que utilizan solo una única vía de enfriamiento, tal como un componente térmico sólido.

[0049] Además, para conmutar el sistema de conmutación de corriente persistente 70, y más en particular, la unidad de devanado 14, del estado normal al estado superconductor, una unidad de calentamiento (no mostrada) se desactiva o APAGA y los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74 se llenan con el refrigerante 28 recibido desde el depósito 18. El refrigerante 28 circula en los primer y segundo tubos refrigerantes 72, 74 para mantener o reducir la temperatura de la unidad de devanado 14 por debajo de la temperatura umbral o la temperatura crítica. Si la temperatura de la unidad de devanado 14 está por debajo de la temperatura umbral, la unidad de devanado 14 conmuta del estado normal al estado superconductor. El estado superconductor es representativo de un estado donde la unidad de devanado 14 proporciona una resistencia nula al imán superconductor. Esta resistencia nula de la unidad de devanado 14 ayuda a formar un bucle persistente con corriente eléctrica que circula entre la unidad de devanado 14 y el imán superconductor, sin ningún suministro de corriente desde una fuente de alimentación (no mostrada en la FIG. 3).

[0050] Típicamente, los sistemas de conmutación de corriente persistente 10, 60, 70 de las FIGS. 1-3 funcionarán en el estado superconductor si la temperatura de la unidad de devanado 14 está por debajo de la temperatura umbral. Los sistemas de conmutación de corriente persistente 10, 60, 70 se conmutan al estado normal en determinadas situaciones. Por ejemplo, puede ser deseable conmutar los sistemas de conmutación de corriente persistente 10, 60, 70 al estado normal en caso de un acontecimiento en el que se tiene que disminuir gradualmente (*ramp down*) el imán. Para conmutar la unidad de devanado 14 del estado superconductor al estado normal, se cierra el componente de control de flujo 38 dispuesto en comunicación fluida con un tubo refrigerante. En particular, el componente de control de flujo 38 se cierra para ahogar o reducir el flujo de entrada de refrigerante 28 desde el depósito 18 al/a los tubo(s) refrigerante(s), y también para evitar el reflujo del refrigerante 28 desde el/los tubo(s) refrigerante(s) al depósito 18. Además, una unidad de calentamiento opcional (no mostrada) se energiza o ENCIENDE para calentar la unidad de devanado 14. Al calentar la unidad de devanado 14, la temperatura de la unidad de devanado 14 se potencia o incrementa por encima de la temperatura umbral, lo que provoca que la unidad de devanado 14 pase del estado superconductor al estado normal. Esta transición de los sistemas de conmutación de corriente persistente 10, 60, 70 al estado normal provoca que el dispositivo magnético, tal como una bobina magnética, conmute para desactivar el imán.

[0051] El refrigerante evaporado se transporta fuera del/de los tubo(s) refrigerante(s) al depósito 18 por medio del recondensador 46. Además, el refrigerante evaporado se vuelve a condensar y se almacena en el depósito 18. Durante la conmutación del sistema de conmutación de corriente persistente 10, 60, 70, y más en particular, la unidad de devanado 14, del estado normal al estado superconductor, este refrigerante recondensado se hace circular de nuevo al/a los tubo(s) refrigerante(s) 26, 72, 74. Los conmutadores de corriente persistente 616 están acoplados operativamente al imán de IRM superconductor 602.

[0052] En referencia ahora a la FIG. 4, se ilustran en una representación gráfica ejemplar, en general con la referencia 100, los tiempos de enfriamiento comparativos logrados entre un sistema de conmutación persistente conocido que usa un componente térmico sólido para enfriamiento directo y un sistema de conmutación de corriente persistente que incluye vías de enfriamiento dobles, de acuerdo con un modo de realización ejemplar. Más específicamente, el gráfico 100 ilustra la temperatura (K) (trazada en el eje y 102) con el tiempo (trazado en el eje x 104) de un sistema de conmutación de corriente persistente conocido que utiliza enfriamiento con derivación térmica de 2 W a 60 K como una vía de enfriamiento sólida (mostrada por la línea trazada 106) en comparación con un sistema de conmutación de corriente persistente que utiliza vías de enfriamiento dobles y, más en particular, una primera vía de enfriamiento que comprende un componente térmico sólido conectado directamente a la unidad de devanado para definir una vía de enfriamiento sólida y una segunda vía de enfriamiento que comprende un tubo refrigerante de helio líquido conectado directamente a la unidad de devanado, como se divulga en el presente documento (mostrado por la línea trazada 108).

[0053] Como se evidencia gráficamente, el tiempo de enfriamiento del conmutador se podría reducir de aproximadamente 300 minutos para el sistema de conmutación de corriente persistente convencional a aproximadamente 20 minutos para el novedoso sistema de conmutación de corriente persistente que incluye vías de enfriamiento dobles como se divulga en el presente documento. Se logra una reducción en el tiempo de enfriamiento del conmutador con el uso de vías de enfriamiento dobles.

[0054] En referencia a la FIG. 5, se representa un diagrama de flujo 110 que ilustra un procedimiento para conmutar de forma alternativa una unidad de devanado entre un primer modo o estado normal y un segundo modo o estado superconductor usando vías de enfriamiento dobles, tal como el sistema de conmutación de corriente persistente 10 de la FIG. 1, de acuerdo con aspectos de la presente técnica. Para facilitar el entendimiento de la presente técnica, el procedimiento se describe con referencia a los componentes de la FIG. 1. Cabe señalar que el primer modo es representativo de un estado normal, mientras que el segundo modo es representativo de un estado superconductor del conmutador de corriente persistente. Además, en el estado normal, el conmutador de corriente persistente proporciona una alta resistencia eléctrica a la corriente que fluye en el dispositivo magnético asociado. Sin embargo, en el estado superconductor, la unidad de devanado de

conmutador de corriente persistente 14 proporciona una resistencia nula a la corriente que fluye en el dispositivo magnético.

**[0055]** El procedimiento comienza en una etapa 112, donde las vías de enfriamiento dobles, tales como las vías de enfriamiento dobles 16 de la FIG. 1, y más en particular, la primera vía de enfriamiento 20 y la segunda vía de enfriamiento 22 de la FIG. 1, y una unidad de devanado, tal como la unidad de devanado 14 de la FIG. 1 están dispuestas dentro de una cámara de vacío, tal como la cámara de vacío 12 de la FIG. 1. En particular, las vías de enfriamiento dobles están dispuestas dentro de la cámara de vacío de manera de proporcionar la primera vía de enfriamiento y, más en particular, un componente térmico sólido, tal como el componente térmico sólido 24 de la FIG. 1, para estar en contacto directo con la unidad de devanado y un tubo refrigerante, tal como el tubo refrigerante 26 de la FIG. 1, y proporcionar la segunda vía de enfriamiento, y más en particular el tubo refrigerante para estar en contacto directo con la unidad de devanado. En un modo de realización, la primera vía de enfriamiento y la segunda vía de enfriamiento utilizan un único tubo refrigerante. El tubo refrigerante incluye una entrada y una salida, tal como la entrada 30 y la salida 32 de la FIG. 1. La entrada está operativamente acoplada a una salida del depósito, tal como la salida 34 del depósito 18 de la FIG. 1, por medio de un canal, tal como el canal 36 de la FIG. 1, definido en el mismo el tubo refrigerante. De forma similar, la salida del tubo refrigerante está operativamente acoplada a una entrada del depósito, tal como la entrada 54 de la FIG. 1, por medio de un recondensador, tal como el recondensador 46 de la FIG. 1. En otro modo de realización, la primera vía de enfriamiento y la segunda vía de enfriamiento utilizan tubos refrigerantes separados y, más en particular, un primer tubo refrigerante, tal como el primer tubo refrigerante 72 de la FIG. 3, y un segundo tubo refrigerante, tal como el segundo tubo refrigerante 74 de la FIG. 3, respectivamente.

**[0056]** Posteriormente, el tubo refrigerante hace circular un refrigerante, tal como el refrigerante 28 de la FIG. 1, para retirar el calor de la unidad de devanado absorbido por el componente térmico sólido y directamente de la unidad de devanado. Puesto que el tubo refrigerante está acoplado al depósito, el refrigerante se recibe inicialmente desde el depósito y circula en el tubo refrigerante para absorber el calor generado por la unidad de devanado, que a su vez reduce la temperatura de la unidad de devanado. En un modo de realización, el refrigerante se recibe desde el depósito cuando una unidad de calentamiento se desactiva o APAGA y al menos una parte del refrigerante se evapora.

**[0057]** Además, en la etapa 114, el conmutador de corriente persistente, y más en particular, la unidad de devanado, se conmuta del primer modo o estado normal al segundo modo o estado superconductor al reducir la temperatura de la unidad de devanado por debajo de la temperatura umbral. La temperatura de la unidad de devanado se reduce por debajo de la temperatura umbral haciendo circular el refrigerante en el tubo refrigerante en contacto con la unidad de devanado y enfriando directamente la unidad de devanado con el componente térmico sólido. En particular, el refrigerante que circula en el tubo refrigerante se puede emplear para absorber el calor generado por la unidad de devanado por medio de las vías de enfriamiento dobles, enfriando de este modo la unidad de devanado. La absorción del calor por el refrigerante da como resultado que la temperatura de la unidad de devanado caiga por debajo de la temperatura umbral. Como consecuencia de la caída de la temperatura por debajo de la temperatura umbral, el conmutador de corriente persistente se conmuta del estado normal o primer modo al estado superconductor o segundo modo. Además, durante el proceso de enfriamiento de la temperatura de la unidad de devanado, se puede evaporar una parte del refrigerante en el tubo refrigerante. Más específicamente, el calor generado por la unidad de devanado se absorbe por el refrigerante en el tubo refrigerante, que a su vez evapora el refrigerante. A continuación, el refrigerante evaporado se transporta del tubo refrigerante por medio de la salida del tubo refrigerante. Además, el refrigerante evaporado se transporta al depósito por medio de un recondensador. En el recondensador, el refrigerante evaporado se vuelve a condensar en refrigerante líquido y se transporta de nuevo al depósito.

**[0058]** Además, en la etapa 116, se detiene la circulación del refrigerante en el tubo refrigerante, incrementando, por tanto, la temperatura de la unidad de devanado hasta una temperatura por encima de la temperatura umbral. Al incrementar la temperatura por encima de la temperatura umbral, el sistema de conmutación de corriente persistente pasa del segundo modo al primer modo. Inicialmente, mientras se hace funcionar el sistema de conmutación de corriente persistente en el estado superconductor o el segundo modo, la temperatura de la unidad de devanado se mantiene por debajo de la temperatura umbral utilizando las vías de enfriamiento dobles, y más en particular la primera vía de enfriamiento y la segunda vía de enfriamiento. Posteriormente, para que el sistema de conmutación de corriente persistente pase del estado superconductor al estado normal, se permite que la temperatura de la unidad de devanado se incremente por encima de la temperatura umbral. Para potenciar o incrementar la temperatura, se puede emplear una unidad de calentamiento opcional para calentar la unidad de devanado. Por tanto, al emplear el procedimiento anterior, el sistema de conmutación de corriente persistente se conmuta de forma alternativa entre el primer modo y el segundo modo de una manera que reduce el tiempo de enfriamiento del conmutador del de una única vía de enfriamiento, típicamente empleando un único componente térmico sólido.

**[0059]** Por tanto, diversos modos de realización proporcionan un conmutador de corriente persistente, y más en particular, un sistema de conmutación de corriente persistente, que se enfría utilizando vías de enfriamiento dobles, con lo que un componente térmico sólido se conecta directamente a la unidad de devanado en un primer

extremo, y un tubo refrigerante en un segundo extremo proporciona enfriamiento a lo largo de una primera vía de enfriamiento y el tubo refrigerante conectado directamente a la unidad de devanado proporciona enfriamiento a lo largo de una segunda vía de enfriamiento. Además, la implementación en un sistema superconductor proporciona una reducción en el tiempo requerido para enfriar la unidad de devanado por debajo de la temperatura umbral y una reducción en el peso del imán al eliminar un gran recipiente de almacenamiento de He líquido que se usa típicamente en imanes superconductores y recircular el He líquido como refrigerante. En diversos modos de realización, no se necesita mantenimiento ni adición de criógeno y se puede reducir el peso del sistema global.

**[0060]** El sistema y el procedimiento para utilizar vías de enfriamiento dobles para conmutar de forma alternativa el sistema y, más en particular, la unidad de devanado, descritos anteriormente en el presente documento, ayudan a reducir el tiempo de conmutación requerido, así como el coste de fabricación y el peso del dispositivo magnético. Además, se puede lograr una reducción del tiempo de preparación/necesario para poner en funcionamiento el sistema y una reducción de la inestabilidad térmica del sistema. Como resultado, se puede reducir la mano de obra para la preparación y el mantenimiento del sistema, se puede incrementar la tasa de funcionamiento del sistema y se puede incrementar la fiabilidad del sistema. Además, puesto que el refrigerante evaporado se vuelve a condensar y circula de nuevo a la unidad refrigerante del sistema de conmutación de corriente persistente, se puede evitar el uso de miles de litros de refrigerante o He líquido en el depósito o recipiente de almacenamiento. Además, la disposición de la presente técnica proporciona un tiempo de respuesta muy rápido, tal como el tiempo de enfriamiento rápido, para el conmutador de corriente persistente.

# REIVINDICACIONES

1. Un sistema de conmutación de corriente persistente que comprende:  
  
5 una cámara de vacío (12);  
  
una unidad de devanado superconductora (14) dispuesta en la cámara de vacío (12) y configurada para conmutar el sistema de conmutación de corriente persistente de un primer modo a un segundo modo cuando una temperatura asociada con la unidad de devanado (14) está por debajo de una  
10 temperatura umbral;  
  
una primera vía de enfriamiento (20) que comprende un componente térmico sólido (24) en contacto directo con la unidad de devanado (14),  
  
15 con lo que el sistema de conmutación de corriente persistente comprende además:  
  
una segunda vía de enfriamiento (22) que comprende un tubo refrigerante (26) dispuesto en contacto directo con la unidad de devanado (14) y configurado para hacer circular un refrigerante en la misma, definiendo la primera vía de enfriamiento (20) y la segunda vía de enfriamiento (22) vías de enfriamiento dobles que están configuradas para enfriar la temperatura de la unidad de devanado (14) por debajo de la temperatura umbral para hacer pasar el sistema de conmutación de corriente persistente del primer modo al segundo modo.  
20  
  
2. El sistema de conmutación de corriente persistente de la reivindicación 1, que comprende además un componente de control de flujo (38, 40) dispuesto para controlar un flujo del refrigerante en el tubo refrigerante (26).  
25  
  
3. El sistema de conmutación de corriente persistente de la reivindicación 2, en el que el componente de control de flujo (38, 40) es una válvula criogénica.  
30  
  
4. El sistema de conmutación de corriente persistente de la reivindicación 3, en el que la válvula criogénica (40) es una válvula biestable.  
  
5. El sistema de conmutación de corriente persistente de la reivindicación 2, 3 o 4, en el que el componente de control de flujo (38) es un limitador de flujo de orificio.  
35  
  
6. El sistema de conmutación de corriente persistente de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además al menos uno de una masa de protección (50) y un depósito intermedio de gas evaporado dispuestos para absorber calor en el refrigerante.  
40  
  
7. El sistema de conmutación de corriente persistente de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el tubo refrigerante (26) está configurado para hacer circular el refrigerante en el tubo refrigerante (26) para absorber el calor generado por la unidad de devanado (14).  
  
8. El sistema de conmutación de corriente persistente de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el componente térmico sólido (24) comprende uno de una varilla de metal térmicamente conductora, una lámina de metal térmicamente conductora y barra de metal térmicamente conductora, en contacto directo con cada uno de la unidad de devanado y el tubo refrigerante (26).  
45  
  
9. El sistema de conmutación de corriente persistente de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además un tubo refrigerante (72) adicional dispuesto en contacto directo con el componente térmico sólido (24) y configurado para hacer circular un refrigerante en el mismo.  
50  
  
10. El sistema de conmutación de corriente persistente de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el tubo refrigerante (26) comprende:  
55 una entrada acoplada a un depósito de refrigerante (18) y configurada para recibir el refrigerante desde el depósito de refrigerante (18); y  
  
una salida acoplada al depósito de refrigerante (18) y configurada para transportar el refrigerante evaporado desde el tubo refrigerante (26) al depósito de refrigerante (18).  
60  
  
11. El sistema de conmutación de corriente persistente de la reivindicación 10, en el que la entrada está configurada para recibir el refrigerante desde el depósito de refrigerante (18) cuando la unidad de devanado (14) está por encima de la temperatura umbral y en el que la salida está configurada para transportar refrigerante evaporado al depósito de refrigerante (18).  
65

12. El sistema de conmutación de corriente persistente de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el refrigerante comprende al menos uno de helio líquido (LHe), hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>), neón líquido (LNe) y nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>).
- 5 13. Un procedimiento para enfriar una unidad de devanado superconductora en un sistema de conmutación de corriente persistente, comprendiendo el procedimiento:  
  
10        disponer una unidad de devanado superconductora (14) y vías de enfriamiento dobles (20, 22) dentro de una cámara de vacío (12), la unidad de devanado (14) acoplada térmicamente a las vías de enfriamiento dobles (20, 22), comprendiendo las vías de enfriamiento dobles (20, 22) una primera vía de enfriamiento (20) y una segunda vía de enfriamiento (22),  
  
15        en las que la primera vía de enfriamiento (20) comprende un componente térmico sólido (24) conectado directamente a la unidad de devanado (14) y la segunda vía de enfriamiento comprende un tubo refrigerante (26) conectado directamente a la unidad de devanado (14) y que tiene un refrigerante dispuesto en la misma;  
  
20        conmutar el sistema de conmutación de corriente persistente de un primer modo a un segundo modo reduciendo una temperatura de la unidad de devanado (14) por debajo de la temperatura umbral, en el que la temperatura se reduce por debajo de la temperatura umbral haciendo circular el refrigerante en el tubo refrigerante (26) y por enfriamiento directo con el componente térmico sólido para retirar el calor de la unidad de devanado (14); y  
  
25        hacer pasar el sistema de conmutación de corriente persistente del segundo modo al primer modo deteniendo la circulación del refrigerante en el tubo refrigerante (26), incrementando, por tanto, la temperatura de la unidad de devanado (14) por encima de la temperatura umbral.
- 30 14. El procedimiento de la reivindicación 13, en el que hacer circular el refrigerante en el tubo refrigerante (26) comprende hacer circular el refrigerante para reducir la temperatura de la unidad de devanado (14) por debajo de la temperatura umbral.
- 35 15. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 13-14, en el que el refrigerante está configurado para absorber el calor generado por la unidad de devanado (14) para reducir la temperatura de la unidad de devanado por debajo de la temperatura umbral.

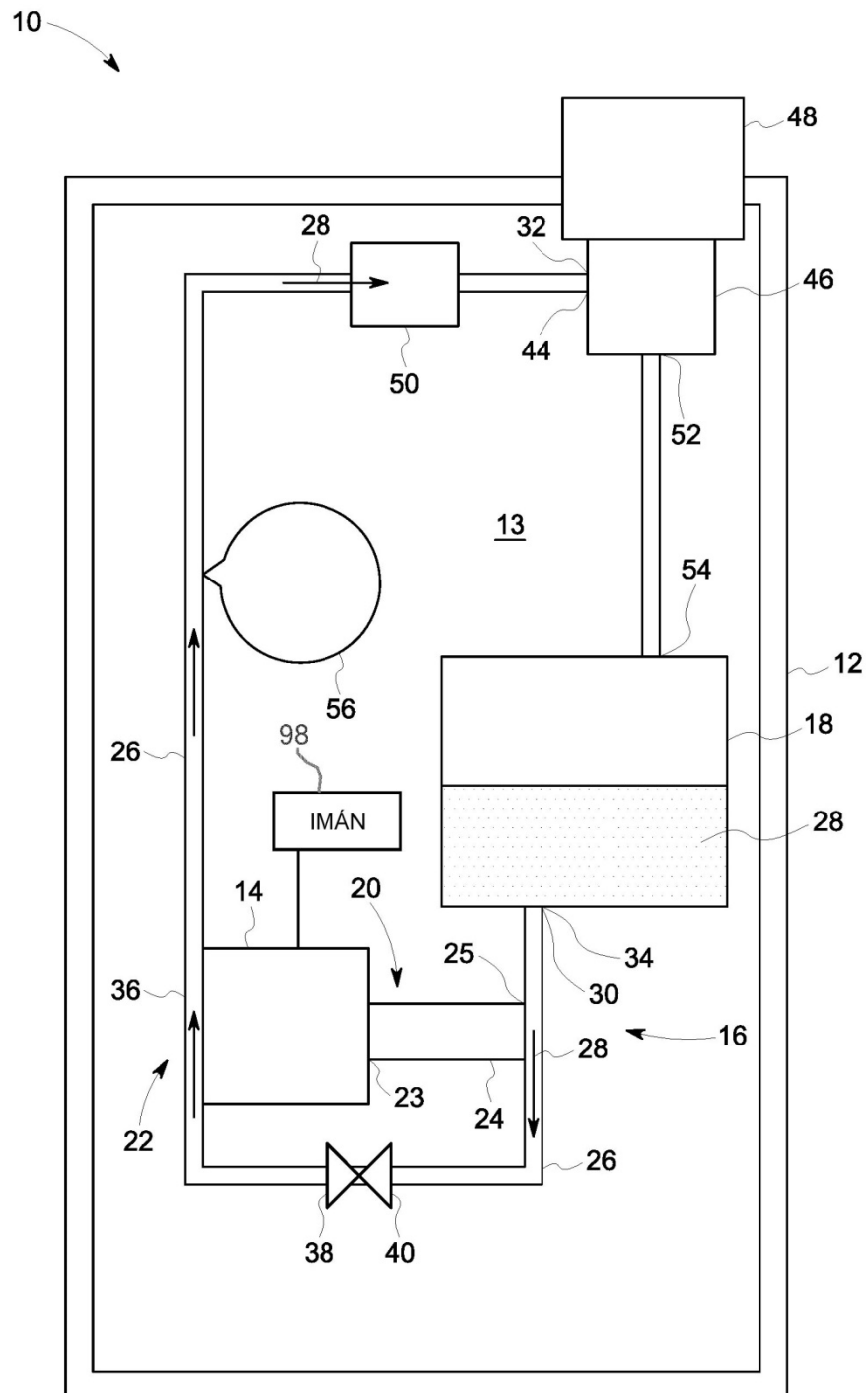


FIG. 1

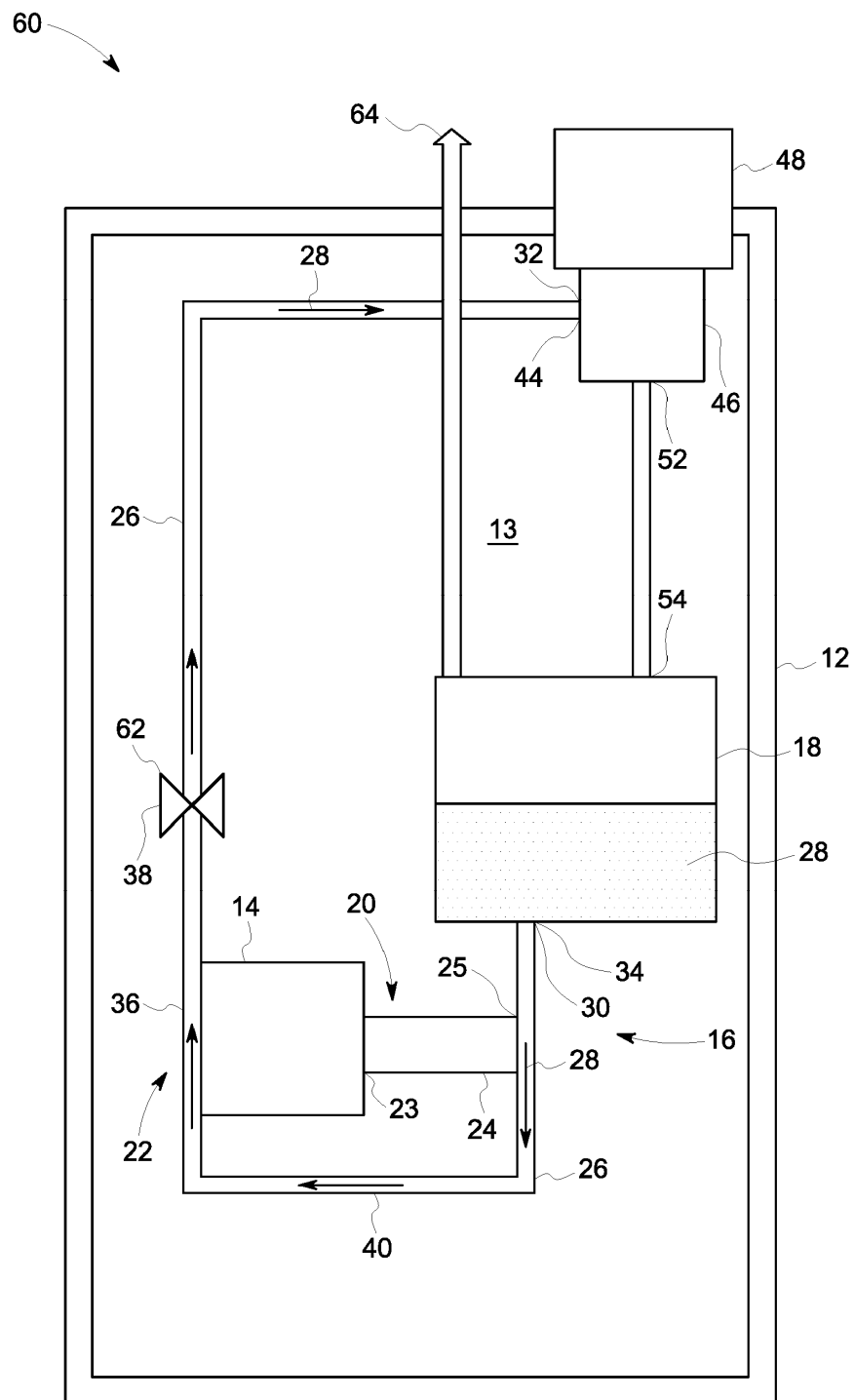


FIG. 2

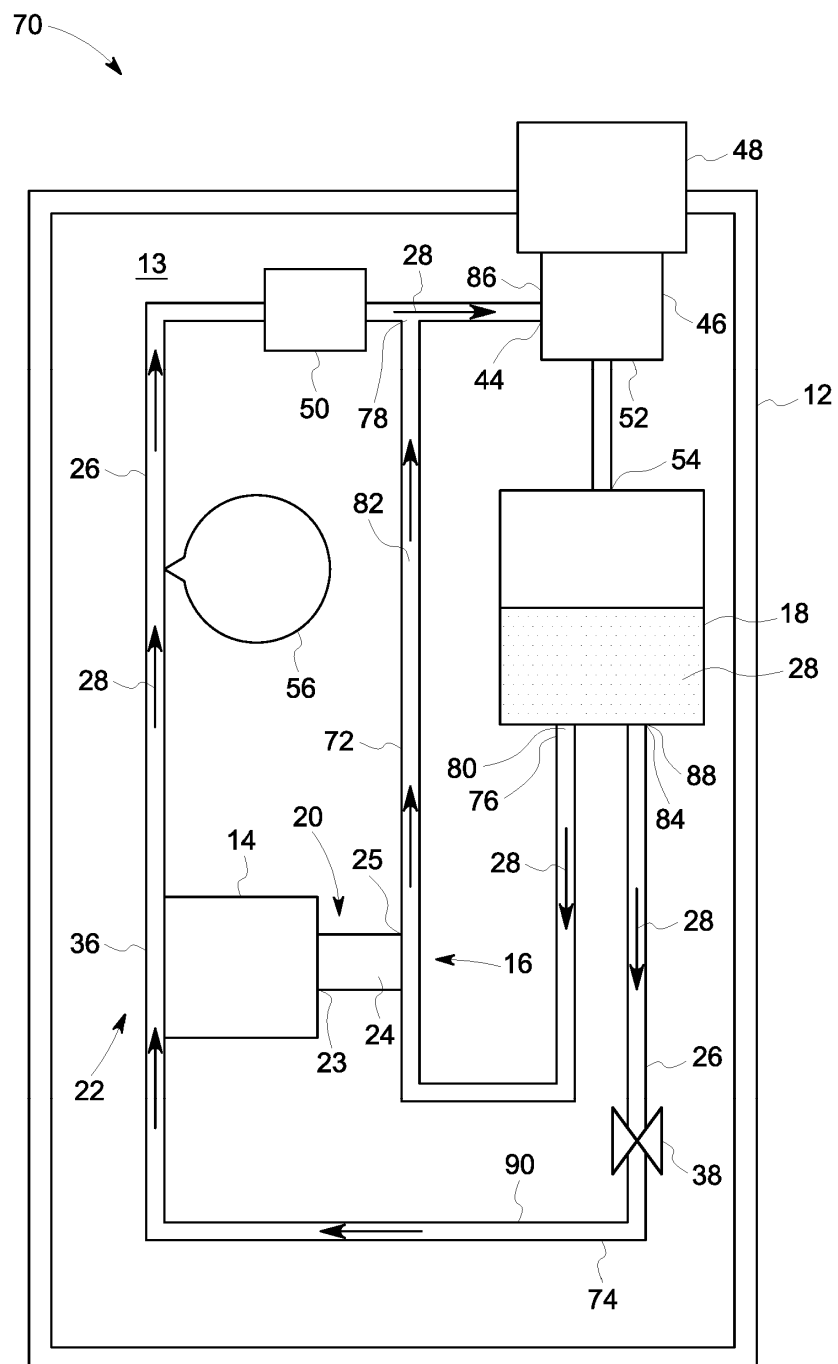


FIG. 3

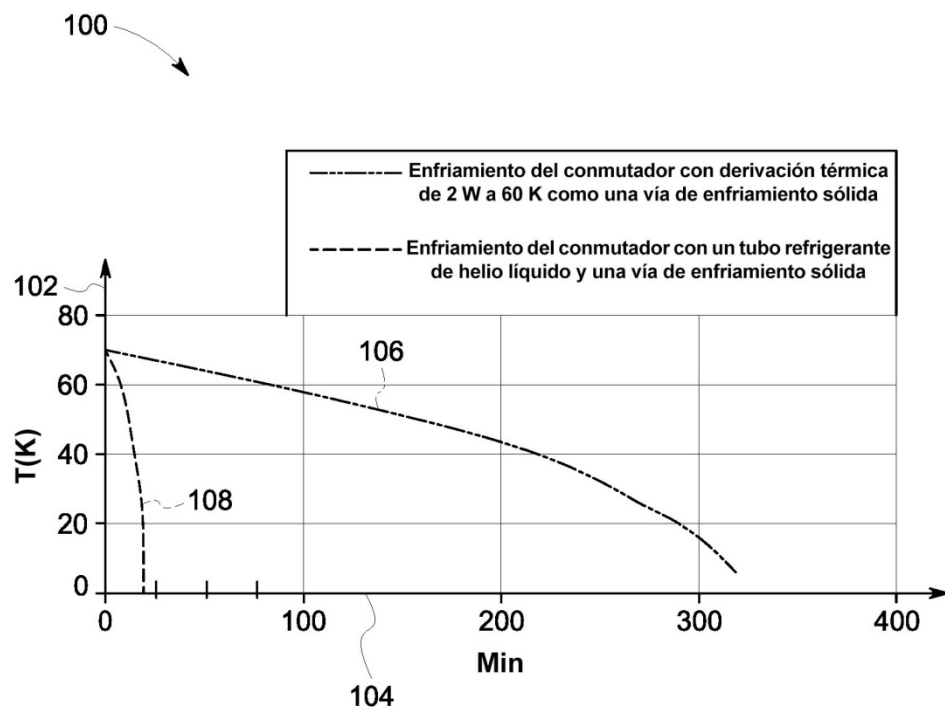


FIG. 4

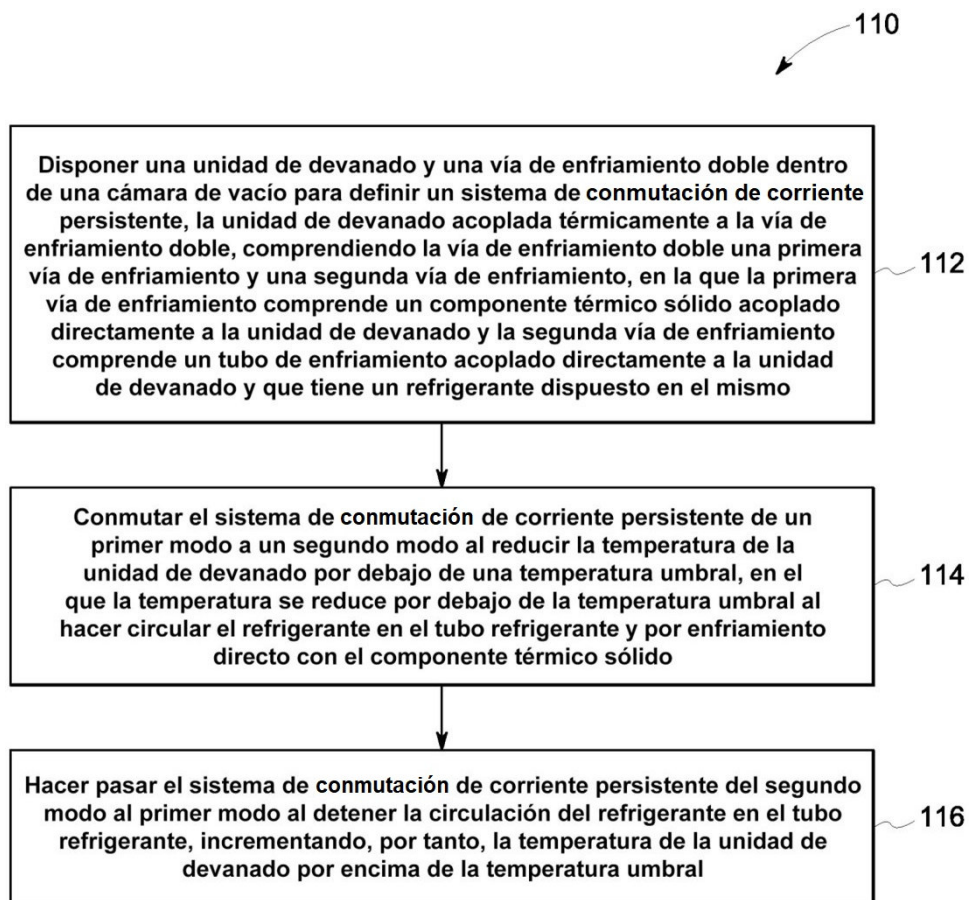


FIG. 5