

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 395 088**

51 Int. Cl.:

**H01F 6/06** (2006.01)

**H01F 38/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.04.2009 E 09728101 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la solicitud europea: **15.12.2010 EP 2260557**

54 Título: **Un limitador de corriente de falta**

30 Prioridad:

**03.04.2008 AU 2008901584**

**16.03.2009 AU 2009901138**

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

**08.02.2013**

73 Titular/es:

**APPLIED SUPERCONDUCTOR PTY LTD (100.0%)  
Suite 7, 1 Lowden Square  
Wollongong, NSW 2500, AU**

72 Inventor/es:

**DARMANN, FRANCIS ANTHONY**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 395 088 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

Un limitador de corriente de falta.

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a limitadores de corriente de falta.

10 La invención se ha desarrollado principalmente para un limitador de corriente de falta de núcleo saturado de alta tensión y se describirá con referencia a esa aplicación. Sin embargo, la invención no está limitada a ese campo particular de uso y también es adecuado para limitadores de corriente de falta de baja tensión, media tensión, tensión extra-alta y tensión ultra-alta.

15 **Antecedentes de la invención**

Se conocen limitadores de corriente de falta (FCL) de núcleo saturado. Ejemplos de dispositivos limitadores de corriente de falta superconductores incluyen:

- 20 • La patente de EE.UU. 7193825 a nombre de Darmann et al.
- La patente de EE.UU. 6809910 a nombre de Yuan et al.
- La patente de EE.UU. 4490769 a nombre de Boenig.
- 25 • La publicación de solicitud de patente de EE.UU. número 2002/0018327 a nombre de Walker et al.

30 Los limitadores de corriente de falta descritos se utilizan con disposiciones de bobinas de cobre de aislamiento seco y, en términos prácticos, solo son adecuados para FCL saturados de CC que utilizan aire como el medio aislante principal. Es decir, el medio aislante estático principal entre las bobinas de fase de CA en un FCL polifásico y entre las bobinas de fase de CA y el núcleo de acero, una bobina de CC, un criostato y la estructura principal se proporciona mediante una separación adecuada con aire. Esto limita sustancialmente el FCL a tecnologías de aislamiento de "tipo seco". Las tecnologías de tipo seco se refieren normalmente a técnicas de construcción de transformadores que utilizan bobinas de cobre aisladas eléctricamente pero sólo aire estático normal y materiales de barrera aislantes, sólidos y aislados como el equilibrio del medio aislante. En general, el aire forma la mayor parte del material aislante eléctrico entre el lado de alta tensión y los componentes conectados a tierra del FCL. Estos componentes conectados a tierra incluyen el armazón de acero y el recubrimiento.

40 La utilización de un aislante seco limita el FCL a intervalos de tensión más bajos de tensiones de líneas de CA de hasta 39 kV aproximadamente. Los transformadores y reactores de tipo seco sólo están disponibles comercialmente hasta niveles de tensión de 39 kV aproximadamente. Como resultado, la tecnología demostrada actual para FCL saturados de CC no es adecuada para extenderse a versiones de alta tensión. Los diseños de tipo seco no permiten diseñar una estructura compacta y dimensionada de manera práctica utilizando aire como el medio aislante cuando se manejan tensiones más altas.

45 Uno de los mercados emergentes principales de los FCL es el intervalo de media a alta tensión (de 33 kV a 166 kV) y de tensión extra-alta (de 166 kV a 750 kV). Cuando se trabaja con estos intervalos de tensión, la técnica y descripciones bibliográficas actualmente descritas de FCL saturados de CC no son prácticas. La razón principal se debe a consideraciones de diseño de tensión estática, por ejemplo una descarga disruptiva en el medio aislante de aire entre las bobinas de cobre de alta tensión y el criostato o núcleo de acero o las bobinas de CC. Las bobinas de fase de alta tensión en el intervalo de media a alta tensión (superiores a los 39 kV) normalmente necesitan estar sumergidas en uno de los siguientes medios:

- 50 • Un gas aislante (tal como SF<sub>6</sub>, nitrógeno, o similar).
- 55 • Vacío (más adecuado que 10<sup>-3</sup> mbar).
- Un líquido tal como aceite de silicona sintético, aceite vegetal u otros aceites aislantes normalmente disponibles utilizados en la tecnología de reactores y transformadores de media tensión, alta tensión y tensión extra-alta.

60 Cuando un dispositivo de alta tensión está sumergido en un medio aislante de este tipo, ese medio se denomina normalmente como el "medio aislante volumétrico" o "dieléctrico".

65 Normalmente, el dieléctrico tendrá una permitividad relativa del orden de 2 a 4 aproximadamente, excepto para un vacío que tenga una permitividad relativa igual a 1. Estos denominados medios aislantes dieléctricos tienen propiedades electrostáticas de resistencia a descargas disruptivas que son muy superiores a las del aire atmosférico

si se utilizan adecuadamente limitando la distancia máxima entre las barreras aislantes sólidas y optimizando la distancia rellena con dieléctrico con respecto a las propiedades de descarga disruptiva de los dieléctricos líquidos o gaseosos particulares.

- 5 Los gases y líquidos aislantes volumétricos comúnmente disponibles tienen por lo general una resistencia a las descargas disruptivas del orden de 10 a 20 kV/mm pero se utilizan normalmente de manera que la fuerza media del campo eléctrico no supere el intervalo comprendido entre 6 y 10 kV/mm aproximadamente. Este margen de seguridad con respecto al valor de la fuerza de las descargas disruptivas es necesario ya que incluso si la fuerza media del campo electrostático está comprendida entre 6 y 10 kV/mm, la fuerza máxima del campo electrostático a lo largo de cualquier línea de campo eléctrico isostático puede ser entre 2 y 3 veces la media debido a varios efectos de mejora del campo electrostático.

En general, hay cinco requisitos principales y deseables de un líquido o gas dieléctrico para requisitos de aislamiento volumétrico de alta tensión en instalaciones alojadas tales como transformadores, reactores y limitadores de corriente de falta:

- El dieléctrico debe mostrar una resistividad muy alta.
- Las pérdidas del dieléctrico deben ser muy bajas.
- El líquido debe poder alojar aislantes sólidos sin degradar dicho aislante sólido (por ejemplo, aislamiento entre vueltas en devanados de bobinas o epoxi).
- La resistencia eléctrica a las descargas disruptivas debe ser alta.
- El medio debe poder evitar pérdidas de energía térmica.

Por lo general, las técnicas de aislantes sólidos no están todavía disponibles en el intervalo de media a alta tensión (es decir, en tensiones de funcionamiento superiores a los 39 kV) para dispositivos alojados tales como transformadores, reactores y limitadores de corriente de falta. El inconveniente de las técnicas de aislantes sólidos es la presencia de los inevitables huecos en el volumen del aislante sólido o entre las superficies de diferentes materiales, tal como entre materiales aislantes para bobinas y otros materiales aislantes sólidos. Se sabe ampliamente que los huecos en los aislantes sólidos con altas tensiones producen una gran fuerza eléctrica en el hueco debido al efecto de mejora de campo. Esto provoca una ruptura física del material circundante debido a descargas parciales y puede dar lugar finalmente a la aparición de corrientes de fuga y a un fallo total del dispositivo.

Debe reconocerse que un limitador de corriente de falta saturado de CC que utiliza una única o múltiples bobinas de CC para saturar el núcleo de acero, tales como los dados a conocer en la técnica anterior mencionada anteriormente, genera graves problemas cuando las bobinas de cobre de fase de CA ya no pueden tener una construcción de "tipo seco" o cuando el medio aislante principal de todo el dispositivo es aire. Un problema importante en tales disposiciones es la presencia del criostato de acero para refrigerar la bobina HTS de CC y de la propia bobina HTS de CC. El criostato, la bobina y los núcleos de acero están esencialmente a un potencial de tierra con respecto a las bobinas de fase de CA.

Una cuestión aparte, pero que mejora los requisitos de aislamiento de todos los equipos e instalaciones de alta tensión, es que el diseño de aislamiento básico también debe cumplir determinadas normas de ingeniería eléctrica que prueban la tolerancia a varios tipos de sobretensiones y pulsos luminosos en periodos de tiempo predeterminados. Ejemplos, en Australia, de tales normas son los siguientes:

- AS2374 Parte 3. Niveles de aislamiento y pruebas de dieléctricos que incluyen la frecuencia de potencia (PF) y pruebas de pulsos de rayos (LI) del todo el transformador.
- AS2374 Parte 3.1. Niveles de aislamiento y pruebas de dieléctricos - Separaciones externas con aire.
- AS2374 Parte 5. Capacidad de soportar cortocircuitos.

Estas normas no forman una lista exhaustiva de las normas que deben cumplir los equipos eléctricos de alta tensión. Debe observarse que cada país tiene sus propias normas que cubren estas mismas áreas de diseño y la referencia a las normas de un país particular no excluye necesariamente las normas de otros países. De manera ideal, se construyen dispositivos que cumplen las normas de múltiples países.

El cumplimiento de estas normas da como resultado un BIL (nivel de aislamiento básico) para el dispositivo o un "DIL" (nivel de aislamiento de diseño) que es normalmente un múltiplo de la tensión de línea de CA básica. Por ejemplo, un transformador de media tensión de 66 kV u otro dispositivo alojado tal como un FCL puede tener un BIL de 220 kV. El requisito para cumplir esta norma da como resultado un diseño de tensión estática que es más difícil

de cumplir en términos prácticos que considerando solamente la tensión de línea de CA. Las normas aplicables y este requisito se deben a que una instalación eléctrica práctica experimenta sobretensiones temporales que pueden ser experimentadas por las estaciones y dispositivos de una red compleja, por ejemplo sobretensiones de rayos y sobretensiones transitorias de conmutación. Por tanto, todo el equipo de una red eléctrica tiene un BIL o DIL apropiado para el peor caso esperado de tensiones transitorias.

Una consideración inicial del problema de diseño estático para los limitadores de corriente de falta saturados de CC de alta tensión puede dar como resultado la conclusión de que el problema se soluciona fácilmente sumergiendo solamente bobinas de cobre de CA de alta tensión en un gas o líquido adecuado eléctricamente aislante. Sin embargo, el problema con esta técnica es que el núcleo de acero debe pasar a través del contenedor que contiene el gas o el líquido. Diseñar esta disposición para un servicio a largo plazo es difícil de resolver mecánicamente. Sin embargo, cabe destacar que resolver el problema de diseño de manera electrostática es mucho más complejo y cualquier solución puede ser propensa a fallos o resultar poco económica. El problema es que debe formarse un sellado entre el recipiente que contiene el fluido dieléctrico y el núcleo de alta permeabilidad o, como alternativa, un procedimiento para aislar el criostato HTS del fluido.

Otra posibilidad es usar barreras sólidas de alta tensión entre fases y entre fases y el núcleo de acero y el criostato o una capa de aislamiento de alta tensión alrededor de las bobinas de fase de cobre y en estrecho contacto con las bobinas de fase. Sin embargo, esto tiene un importante efecto secundario perjudicial. Se sabe que el campo eléctrico estático en combinación con aire y otros materiales con una permitividad relativa superior da siempre como resultado un campo eléctrico mejorado en el material o fluido con la permitividad más baja (es decir, el aire). Por ejemplo, considérese un cilindro de cobre conductor con una capa aislante normal para representar el aislamiento entre vueltas, según la ecuación 1:

$$E_x = \frac{U_m}{x \cdot \left[ \frac{\ln\left[\frac{R}{r}\right]}{\epsilon_2/\epsilon_1} + \frac{\ln\left[\frac{d}{R}\right]}{1} \right]}$$

Ecuación 1

donde:

- $U_m$  = tensión de fase de CA con respecto a tierra.
- $R$  = radio de un cilindro de cobre que incluye un aislamiento externo [mm].
- $r$  = radio de un cilindro de cobre sin revestir [mm].
- $d$  = distancia desde el centro del cilindro hasta el plano de tierra más cercano [mm].
- $\epsilon_2$  = constante dieléctrica relativa del aislamiento que cubre al cilindro.
- $\epsilon_1$  = constante dieléctrica relativa del aislamiento volumétrico en el que está sumergido el cilindro (que es igual a 1 para el aire).
- $x$  = distancia desde el centro del cilindro a un punto fuera del cilindro [mm].
- $E_x$  = gradiente de campo electrostático en el punto  $x$  [kV/mm].

El efecto de mejora de campo está representado por el factor  $\epsilon_2/\epsilon_1$  y es del orden de 2 a 4 para materiales habituales excepto en el caso de utilizar un vacío que tenga una permitividad relativa igual a 1. Proporcionando un material sólido u otro material aislante adicional (de mayor permitividad eléctrica que el aire) se produce un incremento de la fuerza electrostática en el aislamiento de aire volumétrico del FCL. Cuanto mejor sea la calidad del aislante de alta tensión, mayor será el efecto de mejora de campo.

Por tanto, las barreras aislantes, dieléctricas y sólidas en un FCL aislado con aire no son una opción técnicamente deseable para FCL de alta tensión a más de 39 kV y, ciertamente, esta técnica no se utiliza para fabricar transformadores de tipo seco de alta tensión a más de 39 kV, por ejemplo. De hecho, hasta la fecha no se ha desarrollado ninguna técnica adecuada y, por ello, los transformadores de alta tensión por encima de los 39 kV están aislados con un líquido o un gas dieléctricos.

El análisis anterior es la razón por la cual los equipos eléctricos alojados de alta tensión están por lo general

completamente sumergidos en un fluido o gas dieléctrico eléctricamente aislante. Es decir, las bobinas de cobre aisladas y el núcleo de acero de los transformadores y reactores están alojados en un contenedor que se llena después completamente con un medio dieléctrico, el cual es un fluido. Esto reduce sustancialmente los problemas de diseño de tensión electrostática detallados en el análisis anterior. El medio aislante (por ejemplo aceite, vacío o SF<sub>6</sub>) llena todos los huecos y distancias volumétricas entre los componentes de alta tensión y los componentes que están esencialmente conectados a tierra o tienen un potencial neutro. En este caso, las barreras aislantes sólidas pueden incorporarse en el dieléctrico aislante volumétrico y para muchos líquidos tales como aceite; dividir las grandes distancias con un aislante sólido mejora la calidad de todo el aislamiento electrostático incrementando la resistencia de campo del fluido dieléctrico a las descargas disruptivas. Esto se debe a que la permitividad relativa del aceite y del aislamiento sólido son muy parecidas entre sí (por lo que los efectos de mejora del campo disminuyen en comparación con el aire) y la tensión disruptiva del medio dieléctrico volumétrico (expresada en kV/mm) mejora en distancias más pequeñas entre las barreras aislantes.

Un problema importante con la técnica de inmersión total es que no puede adaptarse fácilmente a diseños de FCL saturados de CC o a otros dispositivos que incorporan una bobina superconductora como el elemento de saturación de CC. Esto se debe a que la bobina superconductora y su criostato o recipiente de vacío son un componente del FCL que también deben sumergirse en el fluido dieléctrico.

La bibliografía estipulada señala claramente cuatro criterios principales para un FCL comercial, factible y apto para su fabricación:

- Debe tener una baja impedancia de inserción de manera que sea invisible a la red cuando no haya faltas y cuando se proporcione un pico de flujo de potencia.
- No debe producir más del 0,5% de THD de armónicos (distorsión armónica total) o la requerida por el usuario final.
- Debe proporcionar una fracción adecuada de la corriente de falta, entre el 20% y el 80%.
- El diseño debe poder extenderse a altas tensiones de CA (superiores a 6 kV) y a altas corrientes CA (superiores a 0,6 kA).

Los diseños clásicos de FCL de núcleo saturable detallados en la técnica anterior tienen la gran desventaja de no ser adecuados para diseños de alta tensión y de alta corriente CA. Esta desventaja se debe a la ausencia de refrigerante (diferente al aire) y/o de un dieléctrico líquido o gaseoso.

Incluso si se utiliza un dieléctrico líquido o gaseoso en el diseño clásico de FCL saturables, todavía se necesita un aumento significativo para permitir el acceso al criorefrigerador, al criostato y a los componentes del criostato. Además, deben fabricarse y probarse sellados especiales para aislar las vías de paso del criostato (energía eléctrica, señales eléctricas) con respecto al dieléctrico.

En los diseños de alta corriente CA, el área de sección transversal de cobre requerida para la conducción de la corriente eléctrica requerida es mucho mayor cuando se considera solamente un diseño refrigerado por aire. No es inusual que esta área de sección transversal sea hasta cinco veces mayor. Esto puede hacer que las dimensiones de la bobina de CA sean demasiado grandes para alojarse en el tamaño mínimo de la culata de la estructura del núcleo, lo que requiere una culata más grande para mantener la separación electrostática. Esto aumenta la superficie de ocupación y la masa del FCL clásico, saturable, aislado con aire y refrigerado por aire.

El documento de HE Y.F et al: "*The high voltage problem in the saturated core HTS fault current limiter*", *Physica C: Superconductivity*, vol. 386, 15 de abril de 2003, páginas 527 a 530, da a conocer un limitador de corriente de falta que se incorpora en un circuito eléctrico que incluye un núcleo magnéticamente saturable y al menos una bobina de fase de CA enrollada alrededor de una parte del núcleo saturable, donde dicho núcleo magnéticamente saturable y dicha bobina de fase de CA están alojados dentro de un cerramiento.

Cualquier análisis de la técnica anterior a lo largo de la memoria descriptiva no debe considerarse como una admisión de que tal técnica anterior es ampliamente conocida o forma parte del conocimiento general común en este campo.

### Sumario de la invención

Un objeto de las realizaciones preferidas de esta invención es mitigar una o más de las desventajas mencionadas anteriormente o proporcionar una alternativa útil.

Otro objeto de las realizaciones preferidas de la invención es superar una o más de las desventajas mencionadas anteriormente invirtiendo las ubicaciones relativas convencionales de las bobinas de CA y de CC con un FCL. Estas realizaciones permiten que toda la estructura esté sumergida en un dieléctrico.

- Según un primer aspecto de la invención, se proporciona un limitador de corriente de falta de alta tensión que incluye un núcleo magnéticamente saturable y al menos una bobina de fase de CA enrollada alrededor de una parte de dicho núcleo saturable, donde dicho núcleo magnéticamente saturable y dicha al menos una bobina de fase de CA están alojados dentro de un cerramiento y una bobina de polarización de CC está dispuesta fuera de y rodeando dicho cerramiento la cual, durante condiciones de funcionamiento sin faltas de dicho limitador de corriente, polariza dicho núcleo en una saturación magnética para una baja impedancia de inserción sin faltas en un estado estacionario, pero en condiciones con faltas saca dicho núcleo de la saturación magnética para proporcionar de ese modo una mayor impedancia de limitación de corriente en dicho circuito eléctrico.
- 5
- 10 En una realización, el núcleo de alta permeabilidad se selecciona de entre uno o más de un material laminado de acero para transformadores, acero dulce u otras formas de acero magnético, materiales de ferrita o un material ferromagnético.
- 15 En una realización, el núcleo tiene la forma de una disposición rectangular de columnas de núcleo con bobinas de base de CA enrolladas cada una en columnas respectivas de las columnas de núcleo e interconectadas eléctricamente de tal manera que los sentidos de los campos magnéticos producidos por las bobinas de CA son opuestos.
- 20 En una realización, el limitador de corriente de falta incluye un recipiente que rodea a las bobinas de CA para contener un medio aislante dieléctrico y un medio de refrigeración para dichas bobinas de CA.
- 25 En una realización, la bobina de CC es un superconductor y, más preferentemente, un superconductor a alta temperatura alojado en un criostato y refrigerado por un criorefrigerador.
- 30 En una realización, la bobina de polarización de CC es coincidente y coaxial con las bobinas de fase de CA, de manera que dicha parte del núcleo saturable está totalmente saturada.
- 35 En una realización, el núcleo magnéticamente saturable y las bobinas de CA están sumergidos en un dieléctrico que está en forma de un sólido, un líquido o un gas y que incluye aire en cualquier atmósfera incluyendo vacío.
- 40 En una realización, las columnas del núcleo tienen una sección transversal rectangular y constante a lo largo de las longitudes de las mismas.
- 45 En una realización, el núcleo magnéticamente saturable está construido a partir de un material laminado de acero para transformadores, acero dulce u otro acero magnético, material de ferrita, polvo compacto aislado de alta permeabilidad o un material ferromagnético.
- 50 En una realización, las columnas del núcleo son cónicas hacia los extremos de las mismas, por lo que en un funcionamiento sin faltas del limitador de corriente casi la totalidad de dicho núcleo está saturada.
- 55 Según un segundo aspecto de la invención se proporciona un limitador de corriente de falta, que incluye:
- un terminal de entrada para la conexión eléctrica con una fuente de alimentación que proporciona una corriente de carga;
- un terminal de salida para la conexión eléctrica con un circuito de carga que extrae la corriente de carga;
- un núcleo magnéticamente saturable;
- una bobina de CA enrollada alrededor de una parte longitudinal del núcleo para transportar la corriente de carga entre el terminal de entrada y el terminal de salida; y
- al menos una bobina de CC para inducir un campo magnético en al menos la parte del núcleo y que se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal definida por un cerramiento que aloja al núcleo y a la bobina de CA, donde el campo polariza magnéticamente el núcleo de manera que la bobina de CA pasa de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.
- 60 En una realización, en el estado de baja impedancia, la parte está magnéticamente saturada.
- 65 En una realización, en el estado de baja impedancia, el núcleo está saturado magnéticamente de manera longitudinal más allá de la parte.
- En una realización, en el estado de alta impedancia, la parte está fuera de la saturación magnética.
- 65 En una realización, en el estado de baja impedancia, la impedancia de la bobina de CA es sustancialmente idéntica a la impedancia teórica del núcleo con aire de la bobina de CA.

En una realización, una característica de la una o más características es un aumento de la corriente de carga más allá de un valor de corriente predeterminado.

- 5 En una realización:  
el núcleo incluye una pluralidad de columnas;  
la parte longitudinal está segmentada entre las columnas; y
- 10 la bobina de CA incluye una pluralidad de segmentos de bobina que están enrollados alrededor de columnas respectivas.
- En una realización, las columnas son paralelas.
- 15 En una realización, las columnas se extienden longitudinalmente.  
En una realización, cada columna tiene una sección transversal sustancialmente uniforme.
- 20 En una realización, las columnas tienen sustancialmente las mismas secciones transversales.  
En una realización, la sección transversal de las columnas tiene al menos un eje de simetría.  
En una realización, las secciones transversales de las columnas son simétricas.
- 25 En una realización, las columnas se extienden sustancialmente de manera conjunta dentro de la zona intermedia.  
En una realización, las columnas están separadas entre sí.
- 30 En una realización, las columnas se extienden longitudinalmente más allá de las bobinas de CC.  
En una realización, los segmentos de bobina se extienden conjuntamente de manera sustancialmente longitudinal en la zona intermedia.
- 35 En una realización, la bobina de CA se extiende longitudinalmente más allá de las bobinas de CC.  
En una realización, cada columna se extiende longitudinalmente más allá de la bobina de CA respectiva.
- 40 En una realización, la corriente de carga incluye tres fases y el limitador de corriente de falta incluye tres pares de terminales de entrada y de terminales de salida para las respectivas fases.  
En una realización, el limitador de corriente de falta incluye seis columnas dispuestas en tres pares, donde cada par de columnas está asociado con un par respectivo de terminales de entrada y salida para transportar la fase correspondiente de la corriente de carga.
- 45 En una realización, las columnas de cada par de columnas están unidas conjuntamente mediante culatas.  
En una realización, cada columna incluye entremos longitudinales, y al menos un extremo de cada columna está unido mediante una culata a un extremo adyacente de la otra columna del mismo par.
- 50 En una realización, ambos extremos de cada columna están unidos mediante una culata a extremos adyacentes respectivos de la otra columna del mismo par.  
En una realización, las columnas están unidas mediante una culata de manera magnética y física por medio de un material de alta permeabilidad.
- 55 En una realización, las columnas de cada par son adyacentes entre sí e incluyen caras opuestas separadas.  
En una realización, las caras opuestas son sustancialmente planas.
- 60 En una realización, las caras opuestas son sustancialmente paralelas.  
En una realización, las caras opuestas se extienden sustancialmente de manera conjunta.
- 65 En una realización, el cerramiento contiene un material dieléctrico.

En una realización, la bobina de CA está alojada en el dieléctrico.

En una realización, cada bobina de CC incluye un material de alta conductividad.

- 5 En una realización, el material de alta conductividad se selecciona de entre cobre, aluminio, un material superconductor a alta temperatura, un material superconductor a baja temperatura.

Según un tercer aspecto de la invención, se proporciona un procedimiento de limitación de corriente que incluye las etapas de:

- 10 proporcionar un terminal de entrada para la conexión eléctrica con una fuente de alimentación que proporciona una corriente de carga;

- 15 proporcionar un terminal de salida para la conexión eléctrica con un circuito de carga que extrae la corriente de carga;

proporcionar un núcleo magnéticamente saturable;

- 20 enrollar una bobina de CA alrededor de una parte longitudinal del núcleo para transportar la corriente de carga entre el terminal de entrada y el terminal de salida; e

- 25 inducir un campo magnético en al menos la parte del núcleo con al menos una bobina de CC, donde la bobina de CC se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal definida por un cerramiento que aloja al núcleo y a la bobina de CA, y donde el campo polariza magnéticamente el núcleo de manera que la bobina de CA pasa de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

Según un cuarto aspecto de la invención se proporciona un limitador de corriente de falta, que incluye:

- 30 un terminal de entrada para la conexión eléctrica con una fuente de alimentación que proporciona una corriente de carga;

un terminal de salida para la conexión eléctrica con un circuito de carga que extrae la corriente de carga;

- 35 un núcleo magnéticamente saturable;

una bobina de CA enrollada alrededor de una parte longitudinal del núcleo para transportar la corriente de carga entre el terminal de entrada y el terminal de salida; y

- 40 al menos una bobina de CC que está en una disposición de núcleo abierto con la bobina de CA para inducir un campo magnético en al menos la parte del núcleo, donde la bobina de CC se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal definida por un cerramiento que aloja al núcleo y a la bobina de CA, donde el campo polariza magnéticamente el núcleo de manera que la bobina de CA pasa de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

- 45 Según un quinto aspecto de la invención se proporciona un procedimiento de limitación de corriente que utiliza un limitador de corriente de falta, incluyendo el procedimiento:

- 50 conectar eléctricamente una fuente de alimentación a un terminal de entrada para proporcionar una corriente de carga;

conectar eléctricamente un circuito de carga a un terminal de salida para extraer la corriente de carga;

proporcionar un núcleo magnéticamente saturable;

- 55 proporcionar una bobina de CA enrollada alrededor de una parte longitudinal del núcleo para transportar la corriente de carga entre el terminal de entrada y el terminal de salida; y

- 60 proporcionar al menos una bobina de CC que está en una disposición de núcleo abierto con la bobina de CA para inducir un campo magnético en al menos la parte del núcleo, donde la bobina de CC se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal definida por un cerramiento que aloja al núcleo y a la bobina de CA, donde el campo polariza magnéticamente el núcleo de manera que la bobina de CA pasa de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

- 65 Según un sexto aspecto de la invención se proporciona un limitador de corriente de falta, que incluye:

tres terminales de entrada para la conexión eléctrica con fases respectivas de una fuente de alimentación trifásica que proporciona una corriente de carga trifásica;

5 tres terminales de salida para la conexión eléctrica con las fases respectivas de un circuito de carga que extrae la corriente de carga;

un núcleo magnéticamente saturable que tiene tres pares de columnas, donde cada columna tiene una parte longitudinal;

10 tres bobinas de CA enrolladas alrededor de las partes de los pares respectivos de columnas para transportar la corriente de carga entre los terminales de entrada y los terminales de salida; y

15 al menos una bobina de CC para inducir un campo magnético en al menos las partes y que se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal definida por un cerramiento que aloja a las columnas y a las bobinas de CA, donde el campo polariza magnéticamente el núcleo de manera que la bobina de CA pasa de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

20 En una realización, cada bobina de CA incluye dos segmentos de bobina que están enrollados cada uno alrededor de partes respectivas de las columnas del par de columnas.

Según un séptimo aspecto de la invención se proporciona un procedimiento de limitación de corriente que utiliza un limitador de corriente de faltas, incluyendo el procedimiento las etapas de:

25 conectar eléctricamente tres terminales de entrada a fases respectivas de una fuente de alimentación trifásica para proporcionar una corriente de carga trifásica;

conectar eléctricamente tres terminales de salida a las fases respectivas de un circuito de carga para extraer la corriente de carga;

30 proporcionar un núcleo magnéticamente saturable que tiene tres pares de columnas, donde cada columna tiene una parte longitudinal;

35 proporcionar tres bobinas de CA enrolladas alrededor de las partes de los pares respectivos de columnas para transportar la corriente de carga entre los terminales de entrada y los terminales de salida; y

40 proporcionar al menos una bobina de CC para inducir un campo magnético en al menos las partes y que se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal definida por un cerramiento que aloja a las columnas y a las bobinas de CA, donde el campo polariza magnéticamente el núcleo de manera que la bobina de CA pasa de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

Según un octavo aspecto de la invención se proporciona un sistema de distribución eléctrica que incluye al menos un limitador de corriente de falta de uno de entre el primer, el segundo, el cuarto y el sexto aspecto de la invención.

45 A lo largo de esta memoria descriptiva, las referencias a "una realización" o a "algunas realizaciones" indican que un elemento, una estructura o una característica particulares descritos con relación a la realización están incluidos en al menos una realización de la presente invención. Por tanto, la inclusión de las expresiones "en una realización" o "en algunas realizaciones" en diversas partes de esta memoria descriptiva no se refieren necesariamente a la misma realización, sino a varias. Además, los elementos, estructuras o características particulares pueden combinarse de cualquier manera adecuada en una o más realizaciones, como resultará evidente a un experto en la técnica a partir de esta descripción.

50 Tal y como se utilizan en este documento, a no ser que se indique lo contrario, el uso de los adjetivos ordinales "primero/a", "segundo/a", "tercero/a", etc. para describir un objeto común, indica simplemente que se está haciendo referencia a diferentes instancias de objetos similares, y no pretende señalar que los objetos así descritos deben estar en una secuencia dada, ya sea temporal, espacial, de acuerdo a una clasificación o de cualquier otra manera.

### Breve descripción de los dibujos

60 Ahora se describirán realizaciones actualmente preferidas de la invención con referencia a los siguientes dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una vista esquemática de una estructura de núcleo de FCL experimental;

65 la figura 2 ilustra los resultados de un análisis FEA en la estructura de la figura 1;

la figura 3 ilustra una estructura de núcleo cerrado para un FCL en el que la bobina de CA y la bobina de CC están

solapadas y son coaxiales, es decir, las dos bobinas están enrolladas alrededor de la misma extremidad del núcleo cerrado;

5 la figura 4 ilustra una estructura de núcleo cerrado experimental con bobinas de detección asociadas para permitir un análisis de la naturaleza de la impedancia de inserción;

la figura 5 es una ilustración de los resultados del experimento llevado a cabo con la estructura de la figura 4;

10 la figura 6 resume los resultados de la impedancia de inserción medida para las estructuras experimentales anteriores;

la figura 7 es una vista esquemática en sección transversal de un limitador de corriente de falta de núcleo abierto trifásico según dicha invención;

15 la figura 8 es una vista esquemática de la interconexión eléctrica de los devanados en dos de las columnas de núcleo mostradas en el limitador de corriente de falta de la figura 7;

20 la figura 9 muestra resultados del análisis FEA del campo magnético y de la permeabilidad relativa a través de la longitud de un núcleo en la dirección Z de la figura 7;

la figura 10 muestra un gráfico del campo magnético a lo largo de una línea central con respecto a los núcleos y que atraviesa tres columnas de núcleo en la dirección X de la figura 7;

25 la figura 11 muestra un gráfico del campo magnético en el centro de una única columna de núcleo de la figura 7 con excitación de corriente CC;

la figura 12 muestra un gráfico de la magnetización de CC del núcleo de la figura 7 con pequeñas desviaciones de CC alrededor de dos puntos de funcionamiento saturados;

30 la figura 13 muestra un gráfico de la permeabilidad relativa en el centro de una columna de núcleo de la figura 7 con respecto a la excitación de bobina de CC y con 1000 amperios de corriente en una bobina de CA de 50 vueltas;

35 la figura 14 muestra un gráfico de la magnetización de CC del núcleo de la figura 7 en función de las ampervueltas de CC con la corriente CA total en la bobina de CA de manera que los flujos producidos por cada una son opuestos;

la figura 15 es una forma alternativa de la invención que muestra la misma conexión entre devanados y donde la culata inferior entre dos núcleos está retenida;

40 la figura 16 muestra una disposición de un diseño de FCL de núcleo abierto trifásico con tres filas y dos columnas de núcleos de acero y con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8;

la figura 17 muestra una disposición alternativa del diseño de FCL de núcleo abierto trifásico con dos filas y tres columnas de núcleos de acero y con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8;

45 la figura 18 muestra una alternativa con culatas del FCL de núcleo abierto trifásico y con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8;

50 la figura 19 muestra la disposición experimental utilizada para mediciones de densidad de flujo y de impedancia de inserción sin faltas en un estado estacionario de CA y la caracterización de limitación de corriente de falta, con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8;

la figura 20 muestra las características medidas de impedancia de inserción sin faltas para la disposición experimental de FCL de núcleo abierto;

55 la figura 21 muestra las características de impedancia de inserción en un estado estacionario sin faltas en diferentes tensiones y corrientes de CA;

la figura 22 muestra gráficos de caracterización de corriente de falta para un FCL de núcleo abierto en función de la polarización de CC;

60 la figura 23 muestra gráficos de caracterización transitoria de densidad de flujo de la disposición experimental de núcleo abierto;

65 la figura 24 muestra un gráfico de una tensión transitoria de circuito de CC cuando el núcleo está saturado hasta cierto punto más allá de la región de influencia de la bobina de CA, y donde la presencia de la falta se detecta como una ligera caída de tensión entre los extremos de flecha empezando en  $t = 0,08$  segundos;

la figura 25 muestra gráficos de corriente de falta transitoria de la disposición experimental con y sin el FCL de núcleo abierto en el circuito;

5 la figura 26 muestra las características de corriente transitoria de circuito de CC de la disposición experimental de FCL de núcleo abierto;

10 la figura 27 muestra la disposición experimental de bobinas de CA y CC para la medición y la caracterización de la densidad de flujo, la impedancia de inserción sin faltas de CA y la capacidad de limitación de corriente de falta del FCL con culatas y con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8;

15 la figura 28 muestra la impedancia de inserción medida en un estado estacionario sin faltas de la disposición experimental de FCL de núcleo abierto con culatas en comparación con la medida en el FCL de núcleo abierto sin culatas con extremidades de las mismas dimensiones;

la figura 29 muestra la comparación de impedancia de inserción medida sin faltas entre las disposiciones de núcleo abierto con y sin culatas y en comparación con varias disposiciones de núcleo cerrado;

20 la figura 30 muestra la impedancia de inserción medida en un estado estacionario sin faltas de la disposición experimental de FCL de núcleo abierto con culatas en comparación con la medida en el FCL de núcleo abierto sin culatas con extremidades de las mismas dimensiones;

la figura 31 muestra gráficos de caracterización de corriente de falta para un FCL de núcleo abierto con culatas en función de la polarización de CC;

25 la figura 32 muestra un gráfico de densidad de flujo de la disposición experimental de FCL de núcleo abierto, tomado a partir de una bobina de detección alrededor de una extremidad de acero y situada en la parte superior de la bobina de CA de un FCL de núcleo abierto con culatas;

30 la figura 33 muestra las características de corriente transitoria de circuito de CC de la disposición experimental de FCL de núcleo abierto con culatas;

la figura 34 es una representación esquemática de un FCL en un sistema de distribución eléctrica;

35 la figura 35 es una vista esquemática en perspectiva de un FCL de núcleo abierto monofásico en el que el núcleo incluye dos columnas de acero que están apiladas extremo a extremo.

la figura 36 es una vista desde arriba del FCL de la figura 35;

40 la figura 37 es una vista esquemática en perspectiva de un FCL de núcleo abierto monofásico en el que el núcleo incluye una única columna de polvo compacto;

la figura 38 es una vista desde arriba del FCL de la figura 37;

45 la figura 39 es una vista esquemática en perspectiva de una realización adicional de un FCL que tiene una superficie de ocupación generalmente circular y que incluye culatas entre las columnas en el núcleo;

la figura 40 es una vista esquemática desde arriba del FCL de la figura 39;

50 la figura 41 es una vista esquemática en perspectiva de un FCL similar al de la figura 39 sin las culatas;

la figura 42 es una vista desde arriba del FCL de la figura 41;

55 la figura 43 es una vista esquemática en perspectiva de un FCL que incluye un núcleo que tiene columnas de sección transversal rectangular dispuestas en matrices 3 x 2 apiladas;

la figura 44 es una vista esquemática en perspectiva de un FCL que incluye un núcleo que tiene columnas de sección transversal rectangular dispuestas en matrices 3 x 2 adyacentes; y

60 la figura 45 es una vista esquemática en perspectiva de un FCL que incluye un núcleo que tiene columnas de sección transversal rectangular dispuestas en matrices 3 x 2 apiladas que están unidas por una culata.

#### **Descripción detallada de las realizaciones preferidas**

65 La siguiente descripción con referencia a las figuras 1 a 6 tiene como objetivo proporcionar al destinatario el contexto sobre las realizaciones de la invención.

En primer lugar, se menciona que las características paramétricas utilizadas frecuentemente de las realizaciones preferidas incluyen:

- 5 •  $A_{nucleo}$ : el área de sección transversal de los núcleos de alta permeabilidad bajo la bobina de CA
- $N_{ca}$ : el número de vueltas de CA
- $N_{cc}$ : el número de vuelta de CC
- 10 •  $I_{cc}$ : la corriente de una bobina de CC [A]
- $I_{ca}$ : la corriente de una bobina de CA [A, rms (*valor cuadrático medio*)]
- 15 •  $f$ : la frecuencia del sistema eléctrico
- $Z_b$ : la impedancia base del sistema eléctrico que está protegiéndose
- $Z_+$ : la impedancia de secuencia positiva del sistema
- 20 •  $I_{fp}$ : la corriente de falta prevista del sistema
- $I_{fr}$ : la corriente de falta reducida deseada
- 25 La limitación de corriente de falta y la impedancia de inserción son funciones de los parámetros anteriores.

Es bien sabido por los expertos en la técnica que la magnetización de una estructura de alta permeabilidad como la requerida en el campo de los FCL es propensa a pérdidas de flujo debido a los siguientes dos efectos principales:

- 30 • La dispersión de las líneas del campo magnético alrededor de la bobina de polarización de CC y su retorno a través de una trayectoria meramente de aire.
- Retorno parcial del flujo al núcleo a través del aire, donde el flujo entra en el núcleo pero vuelve a través de una trayectoria de aire en lugar de una trayectoria completa de alta permeabilidad.

35 Por ejemplo, se llevó a cabo un análisis FEA en la estructura de núcleo mostrada en la figura 1. Las características relevantes de esta estructura de núcleo son:

- 40 • Ancho de dimensión de ventana = 290 mm.
- Alto de dimensión de ventana = 350 mm.
- Material: núcleo de acero laminado M6.
- 45 • Laminados utilizados para construir el núcleo: estructura de núcleo recubierta escalonada de 0,35 mm.
- Área de sección transversal del núcleo: 150 mm x 150 mm.

Otros detalles del experimento se muestran en la figura 1 y los resultados completos se muestran en la figura 2.

50 Se observó que se produjo una pérdida de densidad de flujo magnético en las extremidades lejanas y en las culatas. La siguiente tabla 1 resume los resultados de la estructura de núcleo de la figura 1 en el punto de máxima densidad de flujo.

55 Tabla 1: Resultados básicos de densidad de flujo en el prototipo de núcleo de la figura 1

Ubicación	Nº de bobinas de detección utilizadas	Densidad de flujo (T)
Centro de extremidad interior	6	2,12
Extremidad interior cercana a bobina de CC	5	2,07
Culata superior cercana a bobina de CC	4	2,01
Culata superior alejada de bobina de CC	3	2,01

Parte superior de extremidad exterior	2	1,96
Parte central de extremidad exterior	1	1,95

El efecto descrito en este caso es ampliamente conocido por los expertos en la técnica. La reducción de la densidad de flujo en el lado del núcleo de CA de 2,12 Teslas a 1,95 Teslas puede no parecer a primera vista una desventaja. Sin embargo, es la medición del pequeño bucle en la bobina de CA la que revela el problema. Mientras que el pequeño bucle de la bobina en el lado de CC da como resultado una permeabilidad relativa media cercana a 1, como se espera para un núcleo saturado, el pequeño bucle medido al mismo nivel de corriente de bobina de CC revela una permeabilidad relativa de 86. Esto da como resultado una alta impedancia de inserción para el dispositivo y también revela que el núcleo en el lado de CA no está totalmente saturado a pesar de observar el allanamiento clásico en la curva B-H.

Los enfoques para reducir la pérdida de densidad de flujo y mantener saturado el lado de CA del núcleo incluyen:

- Utilizar una mayor área de sección transversal del núcleo en toda la estructura.

- Secciones transversales no uniformes de acero.

- Reducir la longitud magnética total del acero entre la bobina de CA y de CC para formar una estructura de núcleo de perfil bajo.

Sin embargo, como una alternativa a estos enfoques, también resulta práctico colocar las bobinas de CA en las extremidades laterales cercanas tal y como se muestra en la figura 3.

Utilizando esta técnica, la densidad de flujo en las extremidades situadas inmediatamente por debajo de las bobinas de CA es sustancialmente idéntica a la inmediatamente por debajo de las bobinas de CC.

Durante el funcionamiento en el estado estacionario, el flujo de las bobinas de CA debe ser tal que la densidad de flujo magnético en la parte del núcleo de acero bajo influencia no se desature o cambie sustancialmente. Esto provocaría una impedancia de inserción mayor que la mínima posible y generaría un contenido de armónicos en la forma de onda de CA sin faltas en el estado estacionario.

Durante la actividad de limitación de faltas, el flujo generado en las bobinas de CA anula el del núcleo de acero, desaturando una parte del núcleo de acero y provocando que aumente la impedancia terminal de la bobina de CA.

En esta disposición particular, también se reconocerá que las culatas y extremidades exteriores ya no son necesarias (sólo se necesitan las extremidades centrales).

El problema asociado a la pérdida de densidad de flujo en la extremidad que contiene la bobina de CA también está asociado a una mayor impedancia del estado estacionario en el estado sin faltas, también conocido como la impedancia de inserción. La impedancia de inserción asociada a una bobina de CA es directamente proporcional al gradiente del gráfico de la densidad de flujo frente a la fuerza magnetomotriz (MMF). Si la parte del núcleo bajo la influencia de la bobina de CA no está saturada completamente hasta un punto en que se minimiza esta pendiente, entonces la impedancia de inserción será tan alta que no resultará práctica.

Para ilustrar la naturaleza de la impedancia de inserción se construyó una disposición experimental, figura 4, para medirla en varias ubicaciones de la bobina de CA en un núcleo con respecto a la bobina de CC. Se construyó una estructura de núcleo y de bobina con los detalles mostrados en la tabla 2 y en la tabla 3 mostradas a continuación.

Tabla 2

	D.I. (mm)	D.E. (mm)	Altura (mm)	Nº de vueltas	Nº de capas	Resistencia (Ohmios)	Diámetro de cable (mm)
Bobinas de detección			15	25,5	1	1,70	0,5
Bobina de CC	160	184	280	171	3		4,0
Conformador (CC)	150	160	280				
Tamaño interno de ventana de núcleo	650 (alto) X 450 (ancho) mm						
Sección de núcleo	100 X 100 mm						

Tabla 3

Factor de llenado de núcleo de hierro	0,96
Medidor de flujo integrador utilizado	Imán Walker
Ajustes del medidor de flujo	25,5 x 0,96 x 100 = 2448
Bobinas de cobre de CC utilizadas (no superconductoras)	
Construcción y soporte de aluminio. No se utilizó acero dulce	
Bobinas de detección enrolladas directamente y apretadas al núcleo	
Núcleo de acero laminado M6 (grosor de laminado de 0,35 mm)	

5 A continuación se hace referencia a la figura 5. La saturación en el lado de CC se confirmó utilizando bobinas de detección y sondas de Hall. La utilización de las sondas de Hall requirió introducir un entrehierro de 1,3 mm en el núcleo, que no se utilizó durante las mediciones de impedancia de inserción.

Otros detalles de la disposición experimental para la medición de la impedancia de inserción incluyen:

10

- Corriente CC = 100 A de CC
- Tensión de CA = 50 V de CA

15

- Frecuencia de corriente y tensión de CA: 50 Hz

- Corriente CA = 28 A de CA

20

- Vueltas de CA = 50

- Resistencia de bobina de CA = 0,10 Ohmios

25

La figura 6 resume los resultados de la impedancia de inserción medida. La impedancia de inserción mínima se consigue con la disposición de bobinas coincidentes y con el número mínimo de ampervueltas en la bobina de CC requerida para la saturación. El resto de disposiciones, incluyendo aquéllas en las que la bobina de CA está en la misma extremidad que la bobina de CC y muy cerca de la bobina de CC, dan como resultado una mayor impedancia de inserción.

30

Las mediciones de la impedancia de inserción en función de las ampervueltas han confirmado que el núcleo de alta permeabilidad bajo la influencia de la bobina de CA no sólo debe estar saturado, sino que debe estar "supersaturado" para tener la impedancia de inserción mínima teórica.

35

Tal y como se muestra en la figura 34, el limitador de corriente de falta (FCL) está ubicado en una subestación de distribución eléctrica. El FCL se incluye principalmente para limitar la corriente de falta de un transformador, el cual también se muestra. Cuando una subestación incluye más de un transformador, es posible tener un FCL aparte para cada uno de esos transformadores. Sin embargo, en algunas realizaciones, no todos los transformadores de una subestación tienen un FCL asociado.

40

El FCL, en el lado aguas abajo, está conectado eléctricamente a un sistema de distribución eléctrica del cual la subestación forma parte.

45

En otras realizaciones, el transformador y el FCL están ubicados en una instalación diferente a una subestación. Ejemplos indicativos incluyen una red de distribución en un emplazamiento industrial, entre un cogenerador y el resto de la red; y proteger la red eléctrica principal contra la contribución de corriente de falta de un parque eólico, un generador de ondas, un hidrogenerador o parque de energía solar.

50

Para la realización de la figura 34, la estación generadora es una estación generadora calentada por carbón. Sin embargo, en otras realizaciones, la estación generadora es una o más de entre una central hidroeléctrica, una central nuclear y una central eólica.

Haciendo referencia a la figura 7 se ilustra una serie de columnas de alta permeabilidad 1 en una disposición de FCL de núcleo abierto trifásico según una realización de la invención. La dirección Z se define a lo largo de la dirección longitudinal del núcleo de alta permeabilidad, tal y como se muestra. Las columnas están fabricadas a partir de laminados para transformadores, y la dirección de rodamiento de los laminados es a lo largo del eje Z.

Debe apreciarse que las columnas 1 definen de manera colectiva un núcleo para el FCL.

5 Las columnas de alta permeabilidad 1 están hechas de un material laminado de acero para transformadores. En otras realizaciones se utiliza uno o más de entre acero dulce u otras formas de acero magnético, materiales de ferrita o material ferromagnético, o material granular tal como un núcleo hecho de polvo ferromagnético compacto, o un núcleo amorfo vidrioso.

10 Una bobina de CC 2, que tiene como objetivo saturar una parte de las columnas de alta permeabilidad 1, rodea toda la estructura externa del cerramiento. El término “rodear” o similar se utiliza para describir cómo la bobina 2 envuelve el cerramiento o tanque. Es decir, la bobina de CC se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal que aloja al núcleo y a la bobina de CA. En las realizaciones ilustradas, el núcleo y la bobina o bobinas de CA están dispuestos dentro de un tanque u otro cerramiento, y la bobina de CC envuelve este cerramiento. Esto proporciona varias ventajas de empaquetado y rendimiento de las realizaciones preferidas. Como se mencionará posteriormente, las zonas intermedias de las realizaciones se definen mediante tanques respectivos.

15 Un recipiente 3 contiene un medio aislante dieléctrico 4. Este medio es además un medio de refrigeración para las bobinas de CA y puede ser aire ambiente atmosférico.

20 Hay bobinas de CA 5 para transportar la corriente de CA enrolladas en conformadores aislantes 6 e interconectadas eléctricamente entre sí de tal manera que los sentidos del campo magnético producido por cada bobina de CA en el núcleo correspondiente de alta permeabilidad son opuestos.

Hay barreras aislantes 7 entre las fases para mejorar las propiedades de resistencia dieléctrica del medio dieléctrico.

25 Preferentemente, la bobina de CC 2 es también un superconductor y, más específicamente, es un superconductor a alta temperatura alojado en un criostato y refrigerado por un criorefrigerador (no mostrado).

30 La figura 8 muestra la interconexión eléctrica de dos bobinas de CA en la estructura de la figura 7 que muestra el sentido y la dirección de los devanados entre sí.

35 A modo de ejemplo, el FCL saturado de núcleo abierto del tipo mostrado en la figura 7 se analizó utilizando FEA. Las corrientes de CC y de CA se escalonaron con el fin de hallar los valores óptimos de  $I_{cc}$  e  $I_{ca}$  para un número dado de vueltas en cada uno de estos devanados y para comprender la naturaleza de la magnetización de un núcleo abierto. Los parámetros utilizados fueron los de un FCL de subestación típica de 15 kV e incluyen:

- Número de núcleos: 6
- Longitud de una columna de núcleo: 0,6 m
- $A_{núcleo}$ , el área de sección transversal de cada núcleo:  $0,0225 \text{ m}^2$ , con una dimensión de 150 mm x 150 mm
- $N_{ca}$ : 50
- $N_{cc}$ : 500
- $I_{cc}$ : escalonada desde cero hasta 500 A. (Hasta 250.000 ampervueltas de CC en la bobina de CC).
- $I_{ca}$ : escalonada desde cero hasta 1.000 A rms. (Hasta 50.000 ampervueltas de CA en la bobina de CA).

50 Los parámetros de material utilizados son los de los laminados para transformadores M6, con un grosor de 0,35 mm.

55 La figura 9 muestra la distribución del campo magnético y la permeabilidad relativa a lo largo de la longitud en la dirección Z de la estructura mostrada en la figura 7. Se indican la región del núcleo adecuada para colocar una bobina de CA y la región saturada del núcleo de alta permeabilidad. Este resultado muestra, por ejemplo, que la bobina de CA debe estar diseñada de manera que su altura sea de 400 mm y esté situada en el núcleo a una distancia superior a 100 mm desde cada extremo del núcleo.

60 La figura 10 muestra un gráfico del campo magnético a lo largo de una línea que pasa a través del centro de tres núcleos y en la dirección X. Este resultado muestra que el campo magnético en todos los núcleos es suficiente para saturar los seis núcleos en una matriz X-Y de columnas de núcleo a pesar de la distancia no uniforme desde y la relación geométrica con el devanado de la bobina de CC.

65 La figura 11 muestra la magnetización de CC ( $I_{ca} = 0$ ) del núcleo en la región central del núcleo indicada en la figura 9.

La figura 12 muestra la curva de pequeñas desviaciones de magnetización de CA de la parte central del núcleo en dos valores diferentes de corriente de polarización de CC.

5 Considerando solamente la figura 11, puede deducirse que una excitación de bobina de CC de 80.000 ampervueltas de CC (equivalente a una corriente CC de 160 A en la bobina de CC de 500 vueltas) sería suficiente para saturar el núcleo. Sin embargo, considerando las curvas de pequeña magnetización de bobina de CA (figura 12) y la permeabilidad relativa del núcleo bajo excitación de bobina de CA (figura 13), se observa que al menos se necesitan 140.000 ampervueltas de bobina de CC (es decir, al menos 280 A de CC en la bobina de CC) para que el núcleo  
10 tenga una permeabilidad baja relativa y, por lo tanto, conferir una baja impedancia de inserción a la bobina de CA.

La figura 12 muestra que una corriente de CA de hasta 1.000 A en la bobina de CA desaturaría el núcleo con una corriente de funcionamiento de CC tan baja como 160 A (80.000 ampervueltas). Esto no es deseable y un diseño de este tipo daría lugar a una alta impedancia de inserción, una alta THD y una forma de onda de corriente distorsionada.  
15 Como comparación, también se muestra el cálculo del pequeño bucle de magnetización de CC en un punto de funcionamiento de 500 A, el cual es un punto de funcionamiento más deseable. En estas condiciones, el núcleo está supersaturado bajo la bobina de CA y es un punto de funcionamiento más adecuado.

En general, cuando se considera la lista completa de variables de optimización, los cálculos combinados de la magnetización de CC y de la pequeña magnetización de CC no es un enfoque sencillo para obtener las ampervueltas de funcionamiento de CC adecuadas y requiere un largo proceso de optimización FEA. Para simplificar el proceso, se propone un análisis de magnetización estática del núcleo con la bobina de CA excitada al máximo de la forma de onda de corriente bajo una carga máxima. La figura 14 muestra un cálculo FEA de este tipo a partir del cual resulta evidente que, en este caso, se requiere una magnetización de CC de 150.000 ampervueltas  
20 para que el núcleo permanezca saturado en cada punto instantáneo de la forma de onda de corriente de CA.

Por motivos prácticos, es importante que un limitador de corriente de falta tenga una baja impedancia de inserción. En la presente realización, esto se consigue garantizando que el volumen del núcleo de acero bajo la influencia magnética directa de la bobina de CA esté totalmente saturado por la bobina de CC hasta un nivel,  $B_{sat}$ , de manera  
30 que permanezca saturado en la condición de funcionamiento de estado estacionario normal de CA.

El diseño de FCL de núcleo saturable mostrado en la figura 7 cumple los cuatro criterios principales de un FCL y tiene las siguientes ventajas:

- 35 • Menor masa debido a la ausencia de las culatas y extremidades exteriores.
- Menor superficie de ocupación para una corriente de falta dada y un régimen de estado estacionario.
- 40 • Costes de producción económicos.

Invirtiendo las posiciones relativas de la bobina de CA y la bobina de CC, también se obtienen los siguientes beneficios técnicos:

- 45 • La estructura se adapta directamente a diseños de alta tensión y de tensión extra-alta sin necesidad de vías de paso especiales para el dieléctrico o disposiciones entre el vacío y el dieléctrico. La parte central del núcleo de alta permeabilidad puede estar sumergida en un fluido dieléctrico líquido o gaseoso del mismo modo en que un transformador de energía está sumergido completamente en un fluido dieléctrico.
- 50 • Aspectos de la tecnología y el conocimiento acerca del diseño de transformadores de alta tensión con aceite de silicona sintético u otros dieléctricos pueden aplicarse a este diseño básico, incluyendo dieléctricos gaseosos de alta tensión tales como el SF<sub>6</sub>. Esto reduce un importante riesgo presente en el proceso de diseño y desarrollo de las versiones de alta tensión de estos dispositivos.
- 55 • Pueden utilizarse materiales sólidos estándar ampliamente conocidos utilizados para su inmersión en dieléctricos líquidos y utilizados con altas tensiones estáticas.
- Las bobinas de fase de CA cubren un área de las extremidades de acero que está supersaturada.
- 60 • El alcance de la influencia electromagnética de las bobinas de CA es tal que la impedancia de inserción está muy cerca del mínimo teórico que puede establecerse, por ejemplo como se ilustra en la figura 9 y en la figura 13. En estas figuras, FEA ha revelado que la permeabilidad relativa de los núcleos está muy próxima a la unidad a pesar de la distancia no uniforme desde la bobina de CC con forma de pista de carreras.

En otra realización, los núcleos abiertos son cónicos hacia los extremos de tal manera que todo el núcleo  
65 permanece saturado.

En la realización adicional mostrada en la figura 15, las columnas de núcleo de cada fase están conectadas a una culata pero permanecen abiertas en un extremo.

5 La figura 16 muestra una disposición de un diseño de FCL de núcleo abierto trifásico con tres filas y dos columnas de núcleos de acero y con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8 según una realización.

10 La figura 17 muestra una disposición alternativa del diseño de FCL de núcleo abierto trifásico con dos filas y tres columnas de núcleos de acero y con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8 según una realización. La figura 18 muestra una alternativa con culatas del FCL de núcleo abierto trifásico y con interconexiones eléctricas en cada fase según lo detallado en la figura 8 según una realización.

15 La figura 19 muestra un FCL que tiene un núcleo abierto monofásico con los siguientes detalles:

- Dimensiones del núcleo: 100 mm x 100 mm x 570 mm
- Número de vueltas en cada núcleo de bobinas de CA: 20
- 20 • Número de vueltas en la bobina de polarización de CC: 100

25 Los resultados de la disposición experimental mostrada en la figura 19 se proporcionan en las figuras 20 a 26. Más en particular, la figura 20 muestra la impedancia de inserción medida sin faltas en el estado estacionario a 50 Hz a través de los terminales de FCL de núcleo abierto. Hay un cambio distintivo en las características de la impedancia de inserción cuando se aplica una polarización de CC suficiente. En la parte A de la figura 20, por debajo de la impedancia de inserción mínima, la saturación magnética del núcleo de alta permeabilidad no ha alcanzado todavía el volumen total del núcleo bajo la influencia magnética de la bobina de CA. Por tanto, la impedancia de inserción medida es alta.

30 En la parte B de la figura 20, la saturación magnética del núcleo de alta permeabilidad ha alcanzado la extensión de la influencia de la bobina de CA. Esto muestra que una región del núcleo de alta permeabilidad idéntica a al menos la altura de la bobina de CA debe saturarse por la bobina de CC con el fin de obtener la impedancia de inserción mínima para el diseño de núcleo abierto.

35 La figura 21 muestra las características de impedancia de inserción en el estado estacionario sin faltas del FCL de núcleo abierto para varios niveles diferentes de tensión y de corriente y muestra que esta cantidad no depende del nivel de corriente ni del nivel de tensión de CA.

40 Los gráficos de corriente de CA transitoria de la figura 22 muestran la diferencia en la corriente de falta con y sin el FCL presente en el circuito de medición. Estos datos muestran que puede haber reducciones significativas en la corriente de falta para la disposición de FCL de núcleo abierto.

45 La figura 23 muestra la densidad de flujo medida en el núcleo de acero en función del tiempo durante el evento de corriente de falta. Efectivamente, la corriente de falta desatura la región del núcleo de acero bajo las bobinas de CA. Esto da como resultado que el FCL tenga una alta impedancia durante la falta y, por tanto, propiedades intrínsecas y eficaces de limitación de corriente de falta.

50 Los datos mostrados en la figura 24 indican que si el núcleo de alta permeabilidad está suficientemente saturado, entonces la tensión transitoria inducida en la bobina de CC puede manejarse y no es excesivamente nociva durante la falta. Esto es análogo al diseño clásico de núcleo de FCL saturado.

55 La figura 25 muestra las formas de onda de corrientes de falta transitorias medidas con la corriente de falta prevista calculada después de permitir la resistencia de bobina de CA y la componente inductiva sin faltas de estado estacionario de la impedancia de bobina de CA del FCL. La reducción adicional en la corriente de falta desde un pico de 2.000 A hasta un pico de 1.100 A se debe al cambio de magnetización adicional después de permitir la resistencia de bobina de CA y la impedancia de inserción sin faltas en el estado estacionario.

60 La figura 26 muestra los transitorios de corriente de CC medidos durante el evento de falta en varios valores diferentes de corriente de polarización de CC. La corriente de CC transitoria inducida es insignificante si el núcleo de acero está lo suficientemente polarizado.

65 La figura 27 muestra una disposición experimental alternativa del FCL de núcleo abierto que incluye culatas entre los núcleos y que está diseñada para reducir las ampervueltas de polarización de CC necesarias para una baja impedancia de inserción. Los detalles del diseño son los siguientes:

- Dimensiones del núcleo de alta permeabilidad: 100 mm x 100 mm x 570 mm (alto)

- Dimensiones de las culatas: 100 mm x 100 mm x 250 mm (alto)
- Número de vueltas en cada núcleo de bobinas de CA: 20
- Número de vueltas en la bobina de polarización de CC: 100

Una comparación entre los resultados de la impedancia de inserción obtenidos para las configuraciones con culatas y sin culatas se proporciona en la figura 28, donde se muestran las características de la impedancia de inserción medida en el estado estacionario sin faltas a 50 Hz de un FCL de núcleo abierto con y sin culatas.

La figura 29 muestra que la presencia de culatas en la disposición de núcleo en la bobina de polarización de CC desvía la curva de magnetización hacia la izquierda, permitiendo que se utilicen menos ampervueltas para obtener una impedancia de inserción mínima.

La figura 30 muestra el intervalo total de la impedancia de inserción para la configuración con culatas, que muestra una mejora importante en la impedancia de falta de esta disposición con menos ampervueltas de CC aplicadas.

Los gráficos de corriente de falta para la disposición experimental de FCL de núcleo abierto con culatas de la figura 31 muestran las diferencias debidas a la presencia del FCL con culatas en varios modos de polarización de CC en comparación con un sistema sin el FCL.

La densidad de flujo magnético en el material de núcleo altamente permeable medida en la parte superior de la bobina de CA también se midió en la figura 32 e indica el mismo comportamiento característico que en la disposición experimental de núcleo abierto sin culatas.

La figura 33 muestra las formas de onda de corriente transitoria de circuito de CC a través de varios niveles de polarización diferentes. En lo que respecta a la disposición de FCL de núcleo abierto sin culatas, la corriente de CC transitoria inducida es insignificante para núcleos suficientemente polarizados.

El beneficio principal de disponer las bobinas de CC y de CA de la manera ilustrada en las realizaciones, es que las bobinas de CA experimentan toda la densidad de flujo de CC del núcleo de acero bajo la bobina de CC. Los diseños clásicos de FCL saturados tienen la desventaja de transportar el flujo desde las extremidades de CC hasta las extremidades de CA a través de las culatas superiores e inferiores y alrededor de articulaciones a inglete en el núcleo. Las presentes realizaciones prescinden de la culata y las extremidades en el lado de CA transportan el flujo desde las bobinas de CC hasta las de CA de una manera eficaz casi al 100%.

Debe apreciarse que en las realizaciones ilustradas, cada limitador de corriente de falta incluye al menos un terminal de entrada en forma de casquillo de alta tensión para la conexión eléctrica con una fuente de alimentación, tal como un transformador, que proporciona una corriente de carga. Cada una de las realizaciones incluye además al menos un terminal de salida, también en forma de uno o más casquillos de alta tensión para la conexión eléctrica con un circuito de carga, tal como un sistema de distribución eléctrica, que extrae la corriente de carga. También se incluyen un núcleo magnéticamente saturable y al menos una bobina de CA, normalmente una bobina para cada fase de la corriente de carga, que está enrollada alrededor de una parte longitudinal del núcleo para transportar la corriente de carga entre el terminal o terminales de entrada y el terminal o terminales de salida. Una bobina de CC induce un campo magnético en al menos la parte del núcleo y se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal que aloja al núcleo y a la bobina de CA. En las realizaciones ilustradas, las zonas intermedias están definidas por tanques respectivos. El campo inducido por la bobina de CC polariza magnéticamente el núcleo de manera que la bobina de CA pasa de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

Debe apreciarse que en muchas aplicaciones, en particular en las que va a instalarse posteriormente un FCL en una instalación existente, el espacio físico disponible para alojar al FCL está normalmente limitado. Normalmente, la limitación física más importante es el área de ocupación disponible para el FCL. A continuación se hace referencia a las figuras 35 y 36 en las que se ilustra un FCL de núcleo abierto monofásico que se ha desarrollado para aplicaciones con una pequeña área de ocupación. El FCL incluye un terminal de entrada en forma de casquillo de alta tensión para la conexión eléctrica con una fuente de alimentación (no mostrada) que proporciona una corriente de carga. Un terminal de salida, en forma de un cojinete de alta tensión adicional, se conecta eléctricamente a un circuito de carga (no mostrado) que extrae la corriente de carga. Un núcleo magnéticamente saturable tiene la forma de dos columnas similares de acero laminado de alta permeabilidad que se extienden longitudinalmente y que están apiladas entre sí extremo a extremo. Una bobina de CA tiene dos segmentos de bobina que están enrollados de manera opuesta alrededor de partes longitudinales respectivas de las columnas para transportar la corriente de carga entre el terminal de entrada y el terminal de salida. Una corriente de CC, en forma de dos bobinas secundarias separadas, induce un campo magnético en al menos las partes de las columnas y se extiende alrededor de una zona intermedia longitudinal que aloja al núcleo y a la bobina de CA. En esta realización, la zona está definida por el tanque. El campo polariza de manera magnética las columnas, de manera que la bobina de CA pasa de un estado

de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

5 En las figuras 37 y 38 se ilustra una realización adicional con una pequeña área de ocupación. En esta realización se utiliza un núcleo de polvo compacto. Esto proporciona un mayor factor de llenado del material de alta permeabilidad en el área de sección transversal de la bobina de CA del que puede conseguirse con los laminados. Por consiguiente, para la misma área de ocupación y suponiendo que todo lo demás permanece igual, el FCL de esta realización proporciona un mayor rendimiento que el de las figuras 35 y 36.

10 En una realización adicional, el FCL de las figuras 37 y 38 se desarrolla para proporcionar el mismo rendimiento que el FCL de las figuras 36 y 36. Debido al mayor factor de llenado, esta realización adicional tiene una menor área de ocupación que la del FCL de las figuras 37 y 38.

15 Otra realización del FCL se ilustra en las figuras 39 y 40. Esta realización es un FCL de núcleo abierto trifásico que tiene tres pares de columnas paralelas que se extienden conjuntamente de manera longitudinal (un par de columnas para cada fase) para definir de manera colectiva el núcleo. Las columnas tienen una sección transversal constante e uniforme que es asimétrica. Los pares de columnas incluyen culatas, y las columnas, las bobinas de CA asociadas y las culatas están dispuestas dentro de un tanque que contiene un medio dieléctrico que también actúa como un medio de refrigeración.

20 Las figuras 41 y 42 ilustran una realización adicional que es similar a la de las figuras 39 y 40, donde la mayor diferencia es la omisión de las culatas para reducir adicionalmente la cantidad de volumen ocupado por el FCL.

25 Debe apreciarse que los limitadores de corriente de falta ilustrados en las figuras 39 a 42 incluyen columnas similares que incluyen columnas asimétricas que están dispuestas entre sí para definir generalmente un cilindro. Esta forma y disposición relativa u orientación relativa de las columnas también facilitan una pequeña área de ocupación para el FCL.

30 En otras realizaciones se adoptan diferentes enfoques para optimizar el área de ocupación del FCL o para cumplir de otro modo las especificaciones de alojamiento en un emplazamiento dado. Por ejemplo, se hace referencia a la figura 43 que ilustra un FCL que incluye un núcleo que tiene columnas de sección transversal rectangular dispuestas en matrices 3 x 2 apiladas. Los dos segmentos de bobina para la bobina de CA de la misma fase están dispuestos uno debajo del otro. Esta configuración de FCL de núcleo abierto se utiliza, por ejemplo, cuando el área de ocupación de un emplazamiento es limitada y se permite una mayor altura.

35 Una realización adicional se ilustra en la figura 44, en la que un FCL incluye un núcleo que tiene columnas de sección transversal rectangular dispuestas en matrices 3 x 2 adyacentes. Esta configuración de FCL de núcleo abierto se utiliza, por ejemplo, cuando los requisitos de altura son limitados pero se permite una mayor área de ocupación.

40 Un ejemplo adicional de un FCL se ilustra en la figura 45, que incluye un núcleo que tiene columnas de sección transversal rectangular dispuestas en matrices 3 x 2 apiladas que están unidas con culatas.

45 En comparación con el limitador de corriente de falta conocido de núcleo saturable y cerrado de estilo marco de cuadro, las realizaciones descritas anteriormente tienen las siguientes desventajas:

- Una reducción significativa en la masa de acero requerida y, por tanto, menores costes de fabricación, transporte y localización del emplazamiento.

50 • Para un rendimiento similar se reduce el área de ocupación. Esto es particularmente ventajoso a la hora de facilitar la colocación en zonas urbanas densas.

55 • Cuando se utilice un superconductor para la bobina o bobinas de polarización de CC se necesita una menor área de superficie de criostato. Esto da como resultado una menor pérdida de calor ambiental en el estado estacionario y, por tanto, menores requisitos de potencia del criorefrigerador.

60 • Desacoplamiento mecánico de la bobina de polarización de CC y del criostato con respecto a las bobinas de fase de CA y el núcleo de acero. Esto permite bajar el tanque de aceite hacia el área de diámetro interior caliente de la bobina de CC, o las bobinas de CC pueden bajarse hasta por encima de los tanques de aceite que contienen los núcleos y las bobinas de fase.

65 En comparación con las disposiciones alternativas del limitador de corriente de falta, tales como tipos resistivos, tipos resistivos con un reactor externo o interno, un núcleo blindado o estado sólido, el limitador de corriente de falta de núcleo abierto saturable tiene estas ventajas:

• El limitador de corriente de falta de núcleo abierto no dañará una línea protegida y no necesita estar aislado con respecto a una línea protegida si falla alguno de los aspectos de la parte de superconducción, ya sea la bobina de CC, el sistema de vacío o el sistema criogénico. Por tanto, los limitadores de corriente de falta de núcleo abierto de las realizaciones están intrínsecamente a prueba de fallos y pueden dejarse en la línea protegida en estas condiciones. Además, la redundancia asociada a las alarmas y la detección de fallos internos puede ser mucho menos estricta en comparación con diseños que deben dejar de funcionar debido a un fallo interno.

• Ninguna de las bobinas de polarización de CC (ya sea una bobina superconductora o no) está conectada directamente a la línea de alta tensión o de alta corriente de la red o suministro eléctrico que esté protegiéndose. Por tanto, pueden utilizarse procedimientos de diseño eléctrico sencillos, establecidos y ampliamente conocidos para diseñar la parte de alta tensión.

• No se utilizan criógenos líquidos como dieléctrico de CA y, por tanto, los problemas asociados a estos líquidos no están presentes en el diseño de las realizaciones preferidas.

• Los elementos superconductores no están tensionados por la corriente de falta. Por consiguiente, hay muy poca inducción de corriente y tensión en la bobina de CC durante una falta.

• El superconductor no se temple durante una falta y, por tanto, puede utilizarse en línea cuando se utilizan cerradores automáticos o lógica de cierre en los disyuntores y aislantes de una línea protegida.

A lo largo de esta memoria descriptiva, las referencias a “una realización” indican que un elemento, una estructura o una característica particulares descritos con relación a la realización están incluidos en al menos una realización de la presente invención. Por tanto, la inclusión de la expresión “en una realización” en varias partes de esta memoria descriptiva no se refiere necesariamente a la misma realización, pero puede. Además, los elementos, estructuras o características particulares pueden combinarse de cualquier manera adecuada en una o más realizaciones, como resultará evidente a un experto en la técnica a partir de esta descripción.

Asimismo debe apreciarse que en la anterior descripción de realizaciones a modo de ejemplo de la invención, varias características de la invención están agrupadas algunas veces en una única realización, figura o descripción de la misma con el fin de perfilar la invención y ayudar en la comprensión de uno o más de los diversos aspectos inventivos. Sin embargo, no debe interpretarse que este modo de descripción refleja la intención de que la invención reivindicada requiere más características que las enumeradas expresamente en cada reivindicación. En cambio, como reflejan las siguientes reivindicaciones, los aspectos inventivos no están en todas las características de una única realización dada a conocer anteriormente. Por tanto, las siguientes reivindicaciones se incorporan expresamente en este documento en la descripción de la invención, donde cada reivindicación representa una realización diferente de esta invención.

Además, aunque algunas realizaciones descritas en este documento incluyen algunas pero no otras características incluidas en otras realizaciones, las combinaciones de características de diferentes realizaciones están dentro del alcance de la invención y forman diferentes realizaciones, como entenderán los expertos en la técnica.

En la descripción proporcionada en este documento se exponen numerosos detalles específicos. Sin embargo, debe entenderse que las realizaciones de la invención pueden llevarse a la práctica sin estos detalles específicos. En otros casos no se han mostrado en detalle procedimientos, estructuras y técnicas ampliamente conocidos para no oscurecer el entendimiento de esta descripción.

Los expertos en la técnica reconocerán que estos son ejemplos aplicados a diseños específicos que se fabricaron y que los resultados detallados para otros diseños con otros detalles de construcción serán diferentes. Deberán tenerse en cuenta las conclusiones principales y el patrón de resultados.

Aunque la invención se ha descrito con referencia a ejemplos específicos, los expertos en la técnica apreciarán que puede realizarse de otras muchas formas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un limitador de corriente de falta para su incorporación en un circuito eléctrico, incluyendo dicho limitador de corriente de falta un núcleo magnéticamente saturable (1) y al menos una bobina de fase de CA enrollada alrededor de una parte de dicho núcleo saturable, donde dicho núcleo magnéticamente saturable y dicha al menos una bobina de fase de CA (5) están alojados en un cerramiento (3), caracterizado porque una bobina de polarización de CC (2) está dispuesta fuera de y rodeando dicho cerramiento la cual, durante condiciones de funcionamiento sin faltas de dicho limitador de corriente, polariza dicho núcleo con una saturación magnética para una baja impedancia de inserción, pero durante condiciones con faltas saca dicho núcleo de la saturación magnética para proporcionar de ese modo una mayor impedancia de limitación de corriente en dicho circuito eléctrico.
2. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 1, que incluye solamente una bobina de polarización de CC.
3. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 1, que incluye dos o más bobinas de polarización de CC.
4. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 3, en el que las bobinas de polarización de CC están separadas.
5. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicha bobina de polarización de CC es un superconductor a alta temperatura.
6. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 5, en el que dicha bobina de polarización de CC es coincidente y coaxial con dicha al menos una bobina de fase de CA, de manera que dicha parte del núcleo saturable está totalmente saturada.
7. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 6, en el que dicho núcleo magnéticamente saturable tiene la forma de una matriz de columnas de núcleo con bobinas de fase de CA enrolladas cada una en columnas respectivas de dichas columnas de núcleo e interconectadas eléctricamente de tal manera que los sentidos de los campos magnéticos producidos por dichas bobinas de CA son opuestos.
8. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 7, en el que dichas columnas de núcleo tienen una sección transversal rectangular.
9. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 7 o la reivindicación 8, en el que las columnas de núcleo están conectadas mediante una culata en un extremo y están abiertas en el otro extremo.
10. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, en el que dichas columnas de núcleo tienen una sección transversal constante a lo largo de las longitudes de las mismas.
11. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, en el que dichas columnas de núcleo son cónicas hacia los extremos de las mismas, por lo que durante un funcionamiento sin faltas del limitador casi la totalidad de dicho núcleo está saturada.
12. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho limitador tiene una configuración de núcleo abierto.
13. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 12, en el que una región de dicho núcleo idéntica a al menos la altura de la bobina de CA está saturada casi totalmente por la bobina de CC para obtener una impedancia de inserción mínima durante condiciones de funcionamiento sin faltas.
14. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho núcleo magnéticamente saturable está hecho de un material laminado de acero para transformadores, acero dulce u otro acero magnético, material de ferrita, polvo compacto aislado de alta permeabilidad o un material ferromagnético.
15. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho núcleo magnéticamente saturable y dichas bobinas de fase de CA están sumergidos en un dieléctrico (4).
16. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 15, en el que dicho dieléctrico está en forma de un líquido o un gas.
17. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que dicha bobina de polarización de CC está en forma de una bobina de CC con forma de pista de carreras.

18. Un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho cerramiento incluye medios de refrigeración además de un dieléctrico (4).

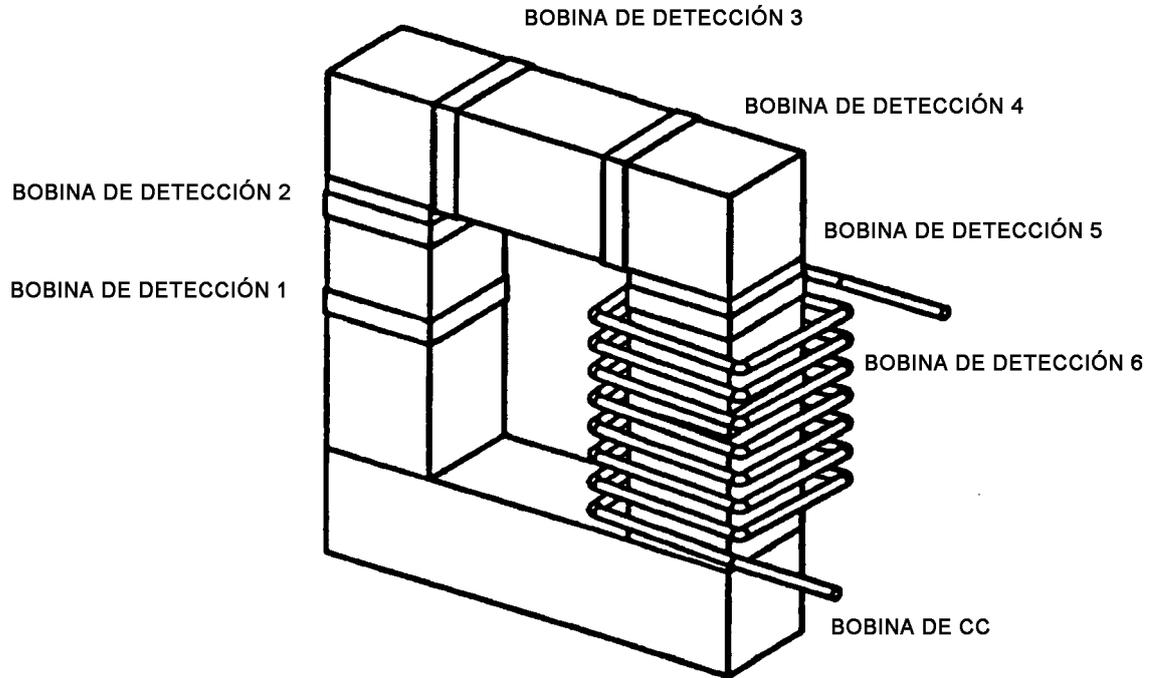


Figura 1.

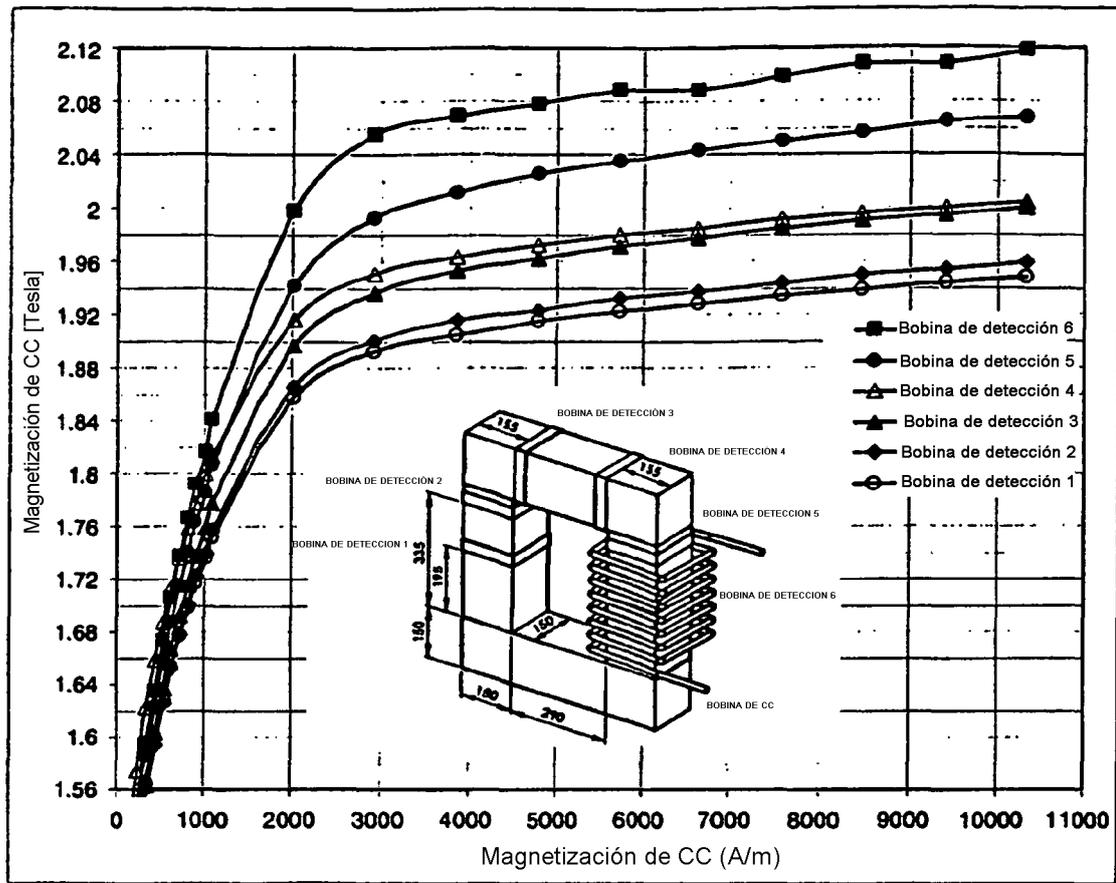


Figura 2.

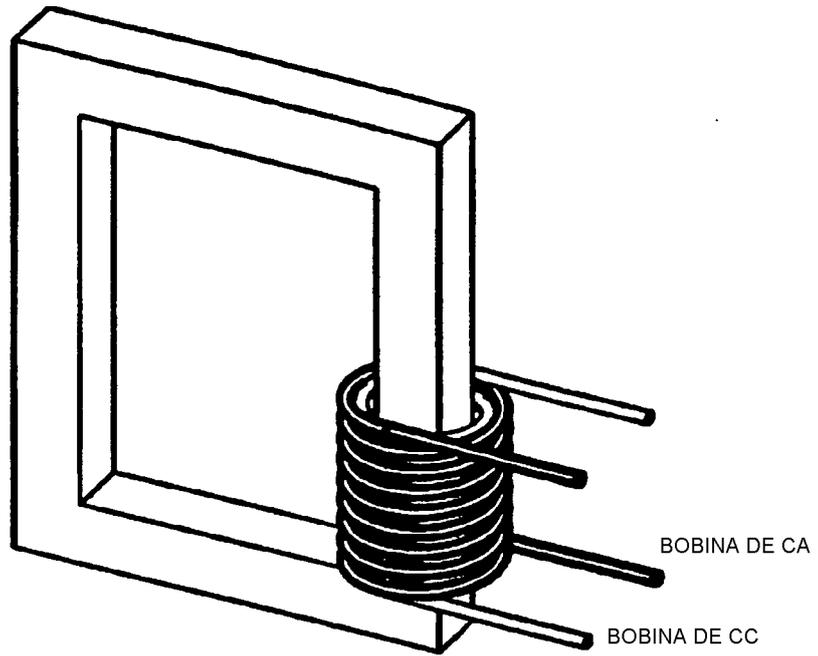


Figura 3.

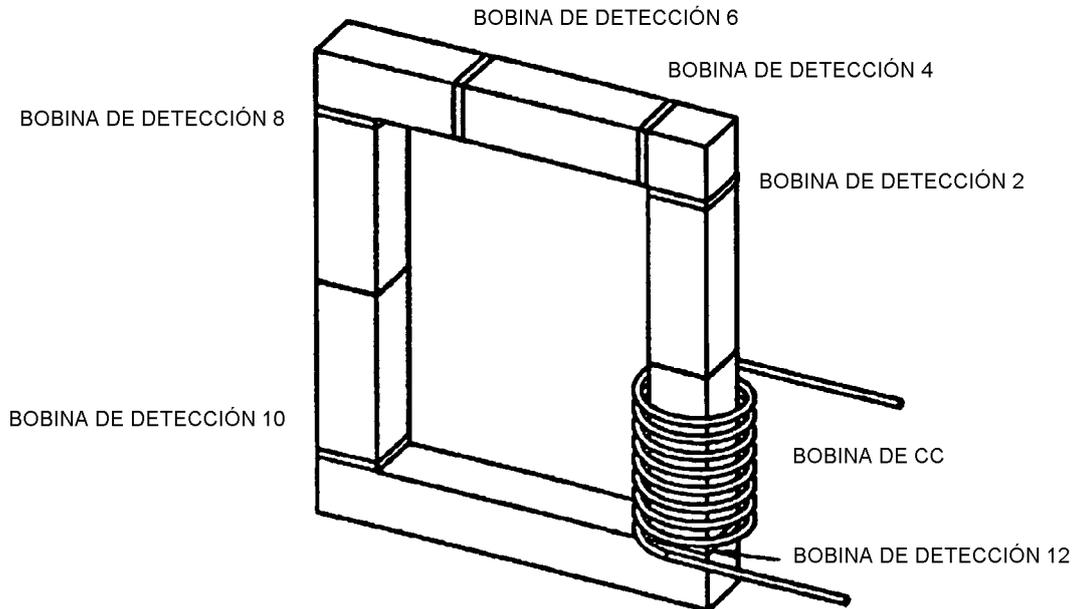


Figura 4.

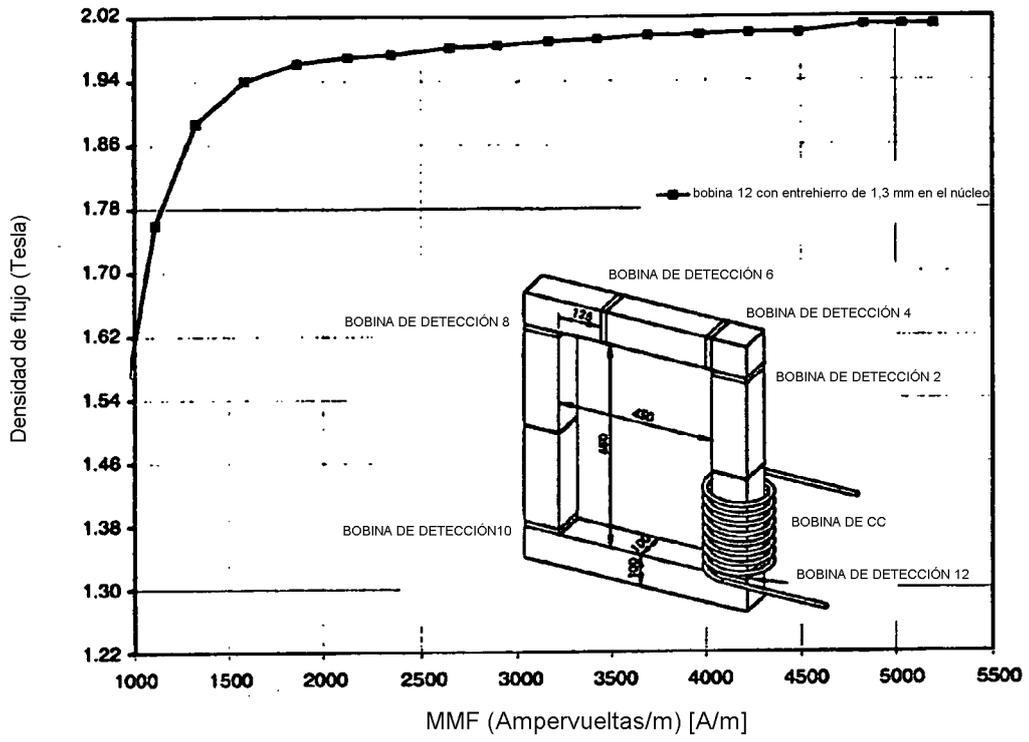


Figura 5.

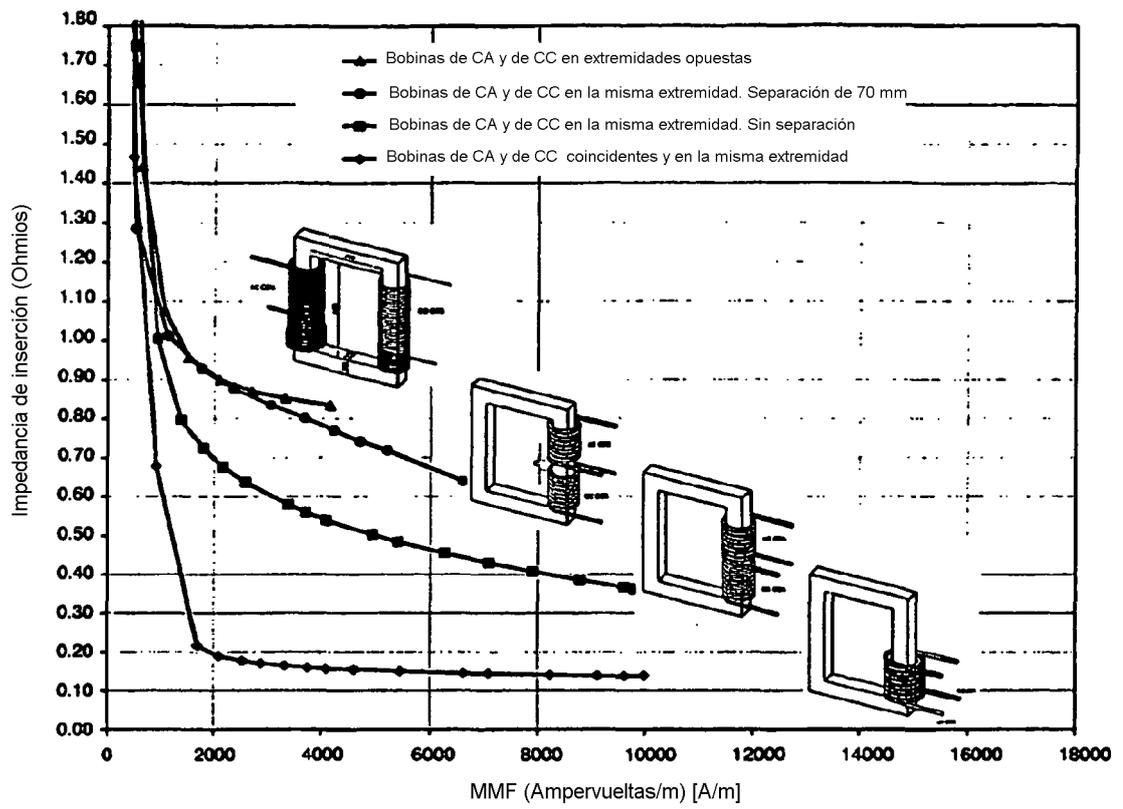


Figura 6.

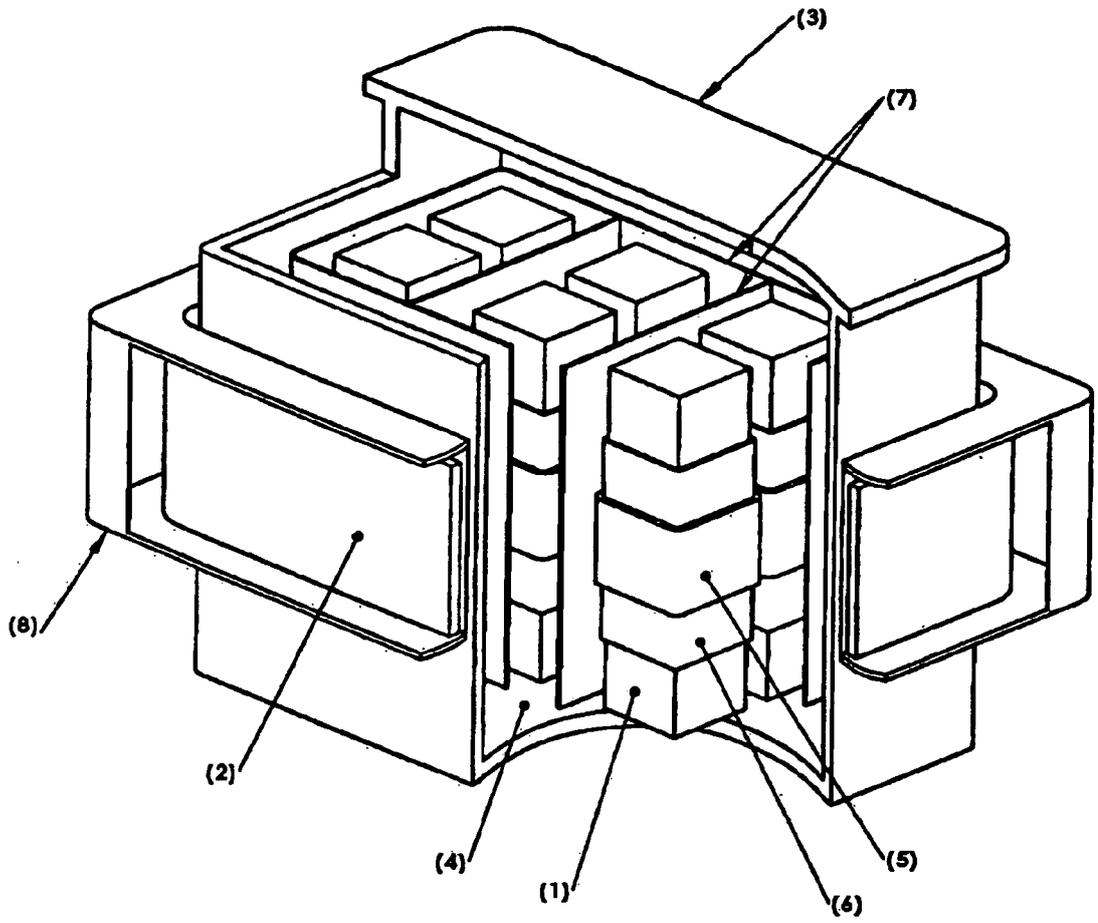
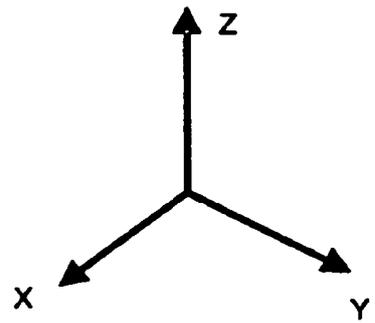


Figura 7.



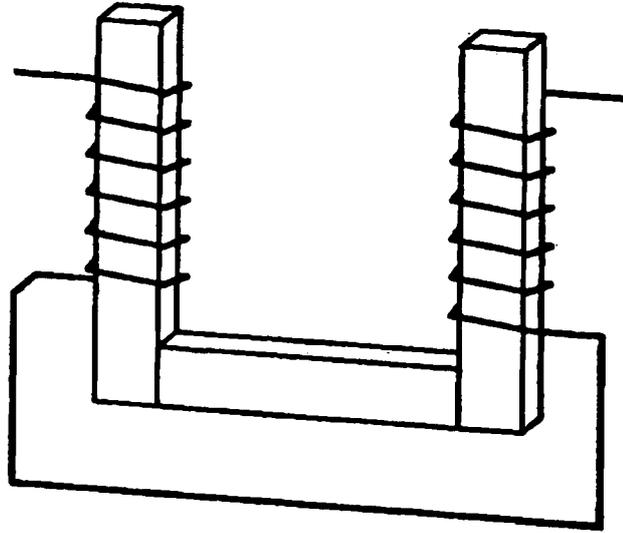


Figura 8.

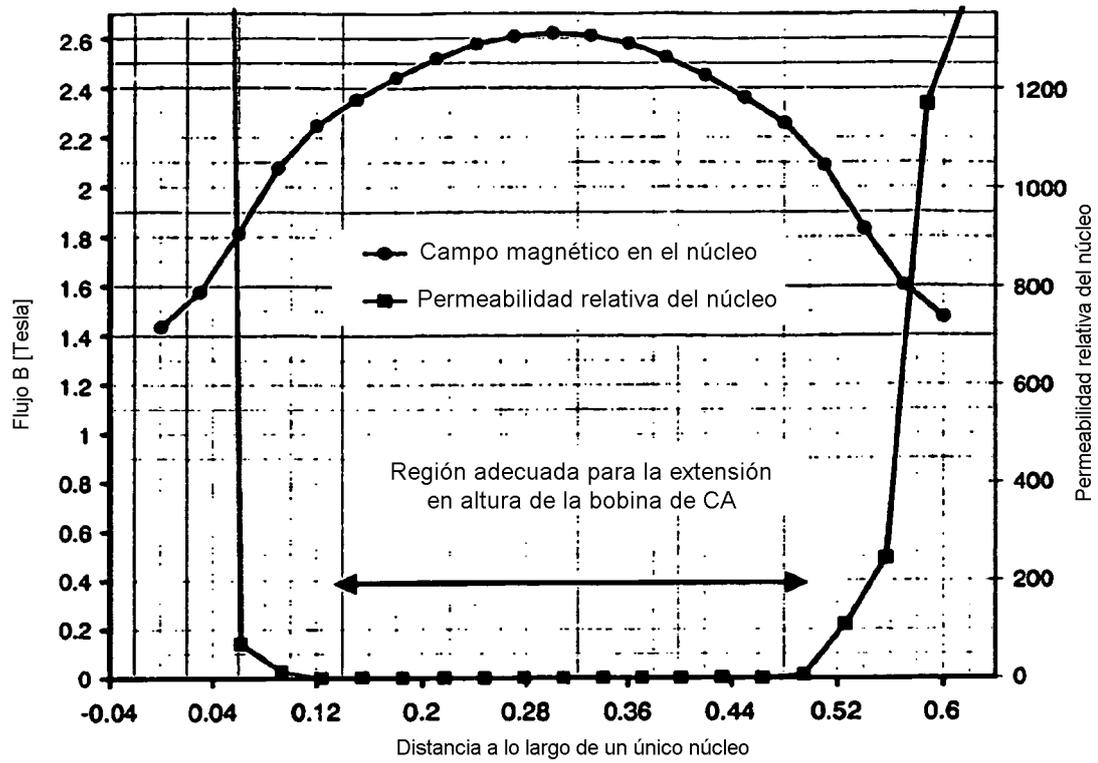


Figura 9.

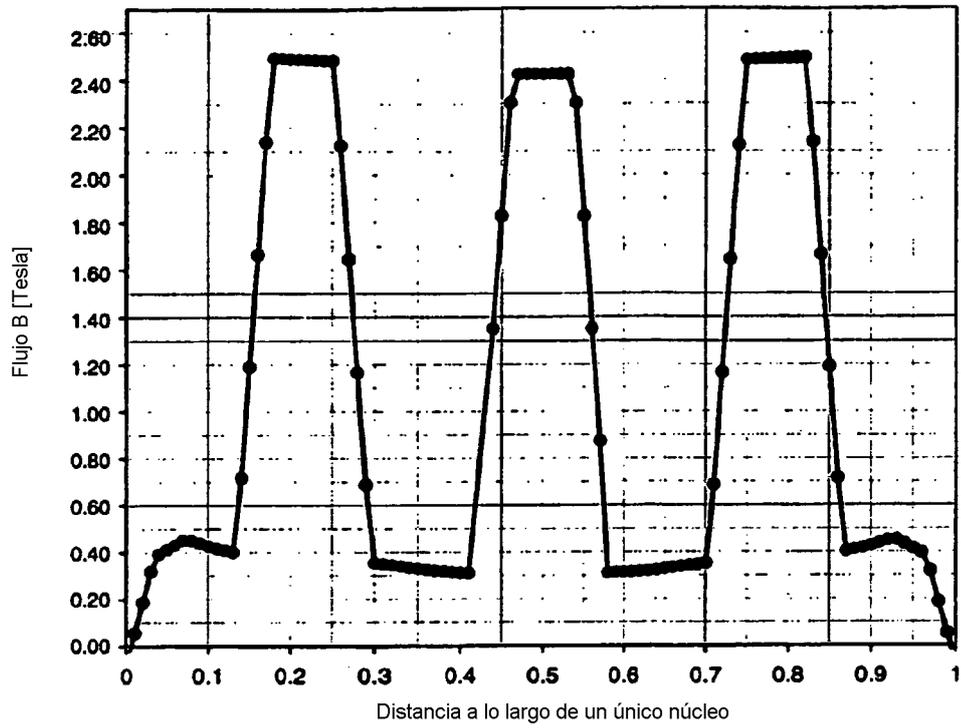


Figura 10.

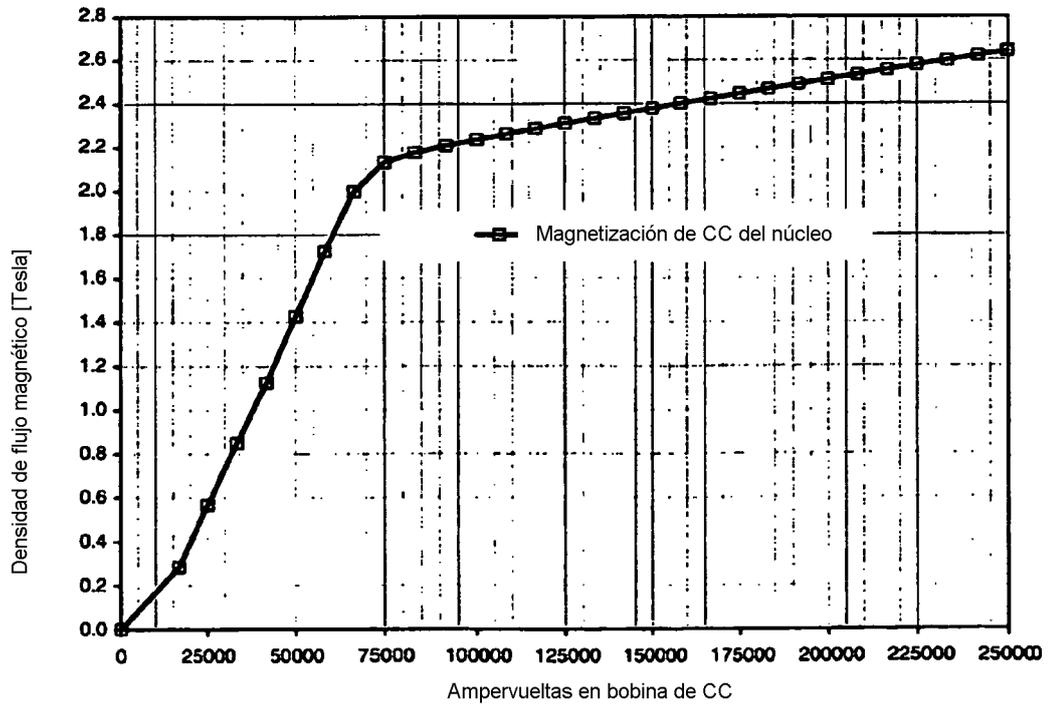


Figura 11.

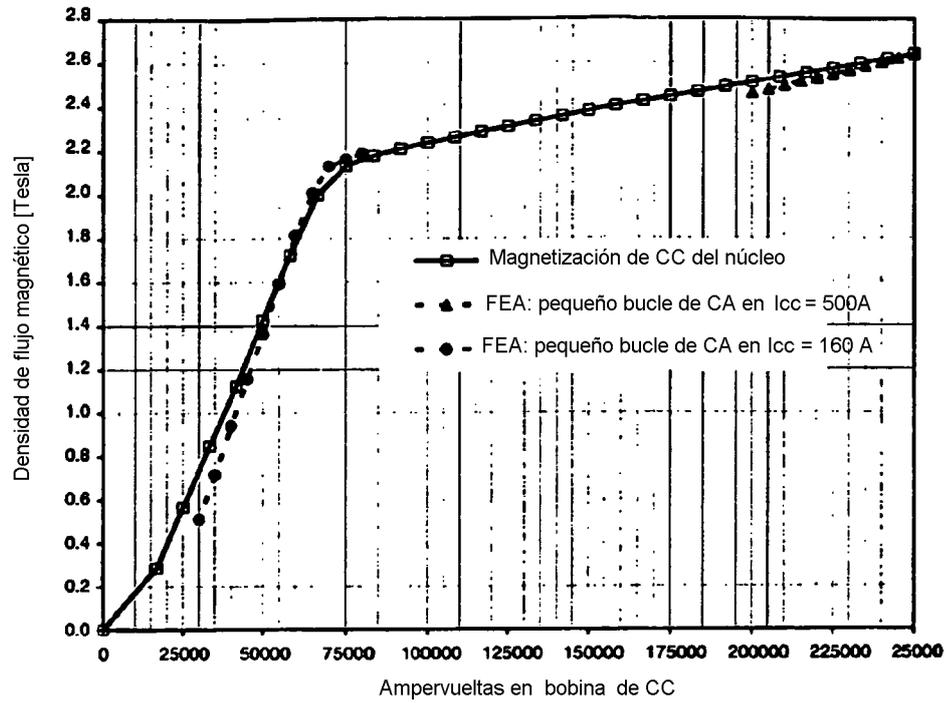


Figura 12.

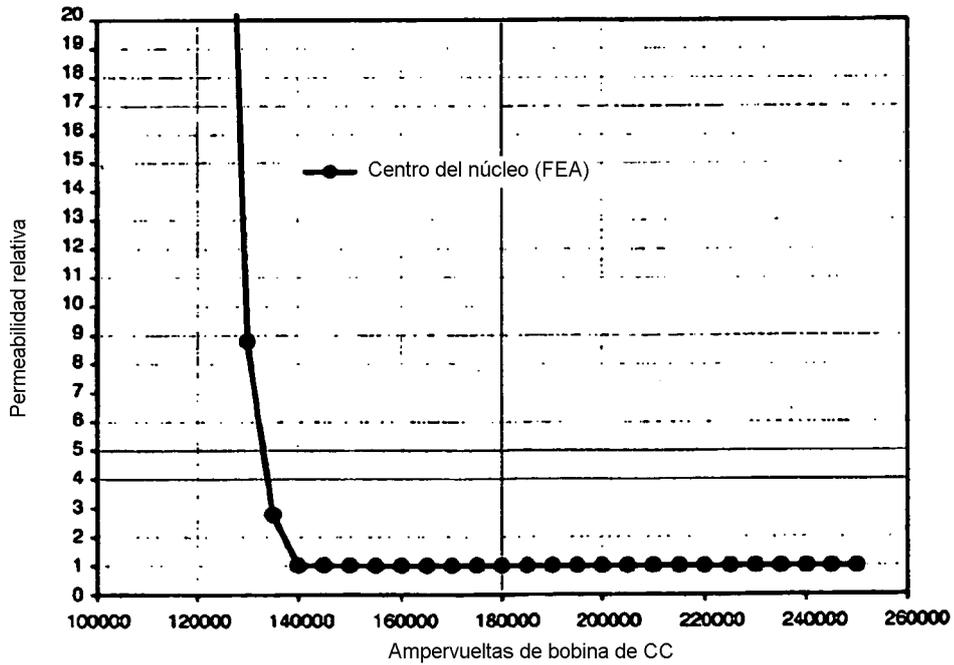


Figura 13.

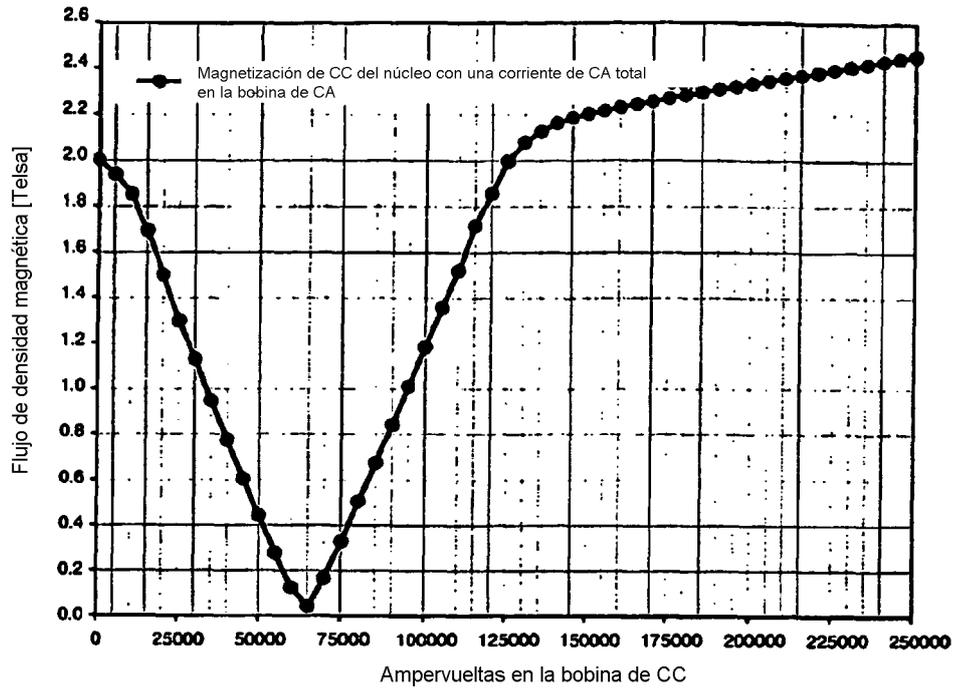


Figura 14.

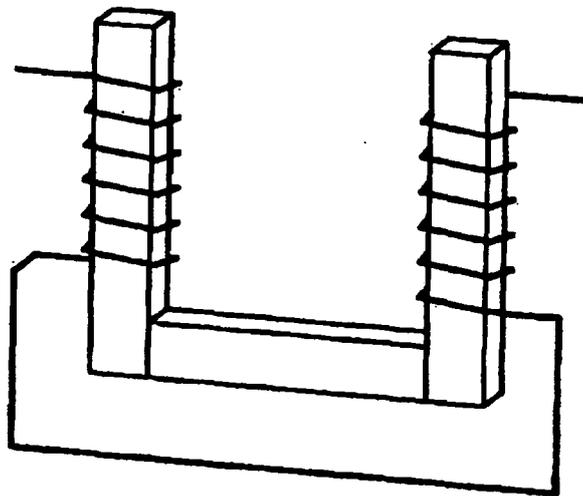


Figura 15.

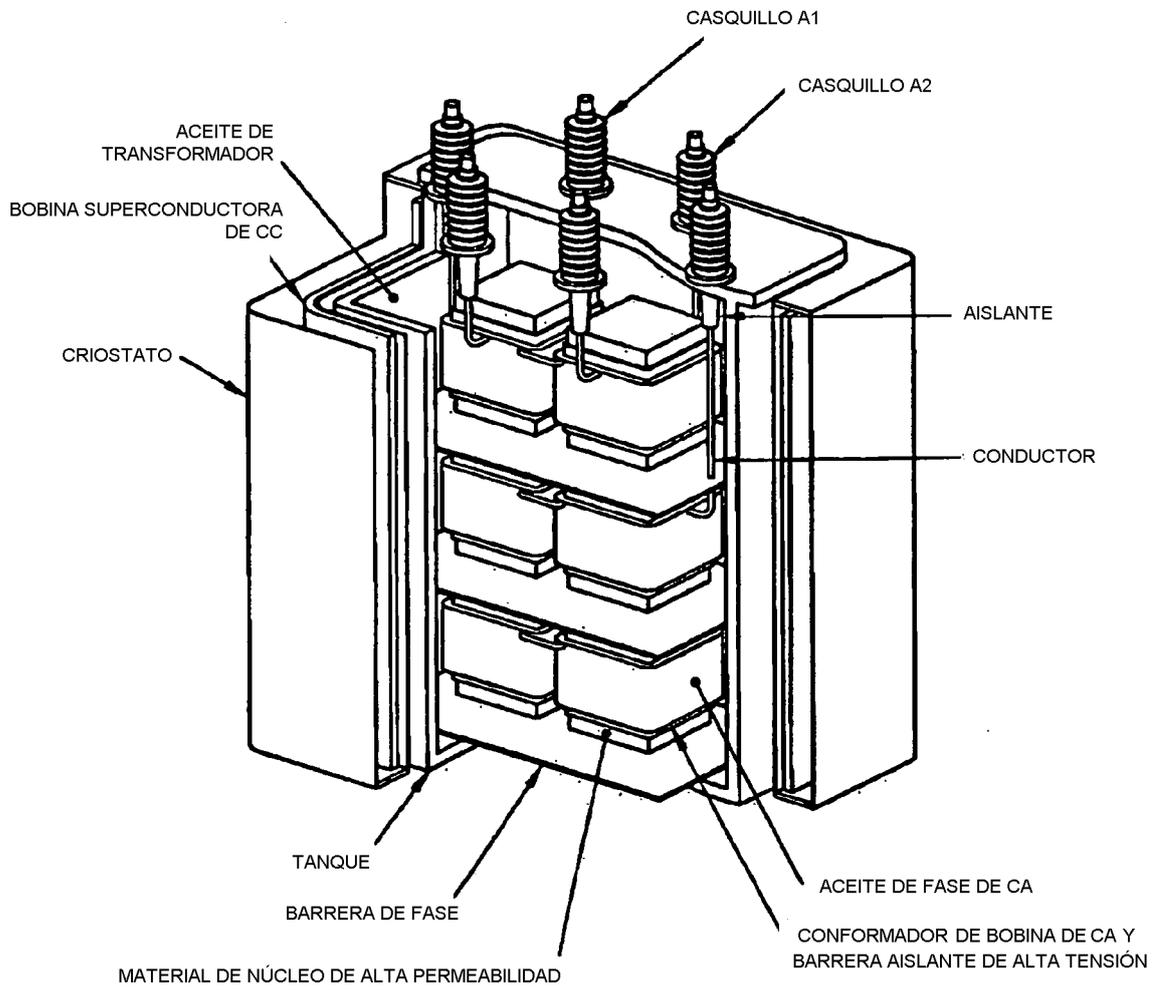


Figura 16.

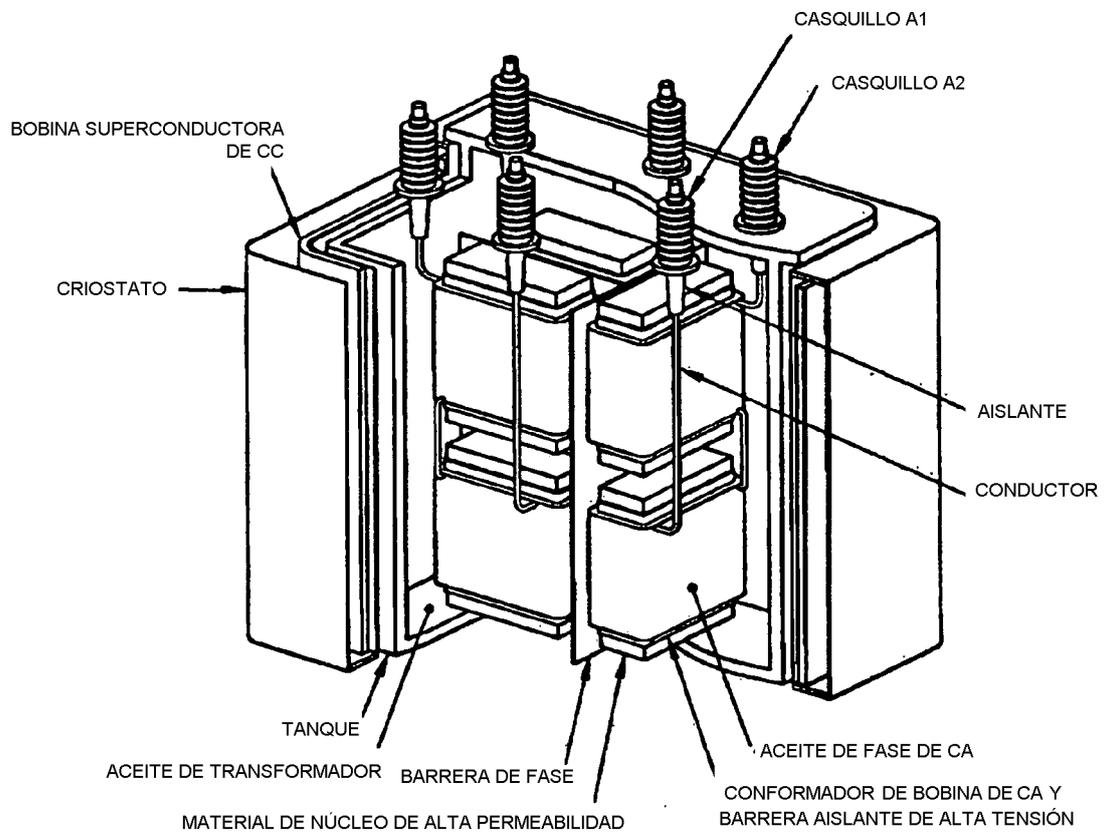


Figura 17.

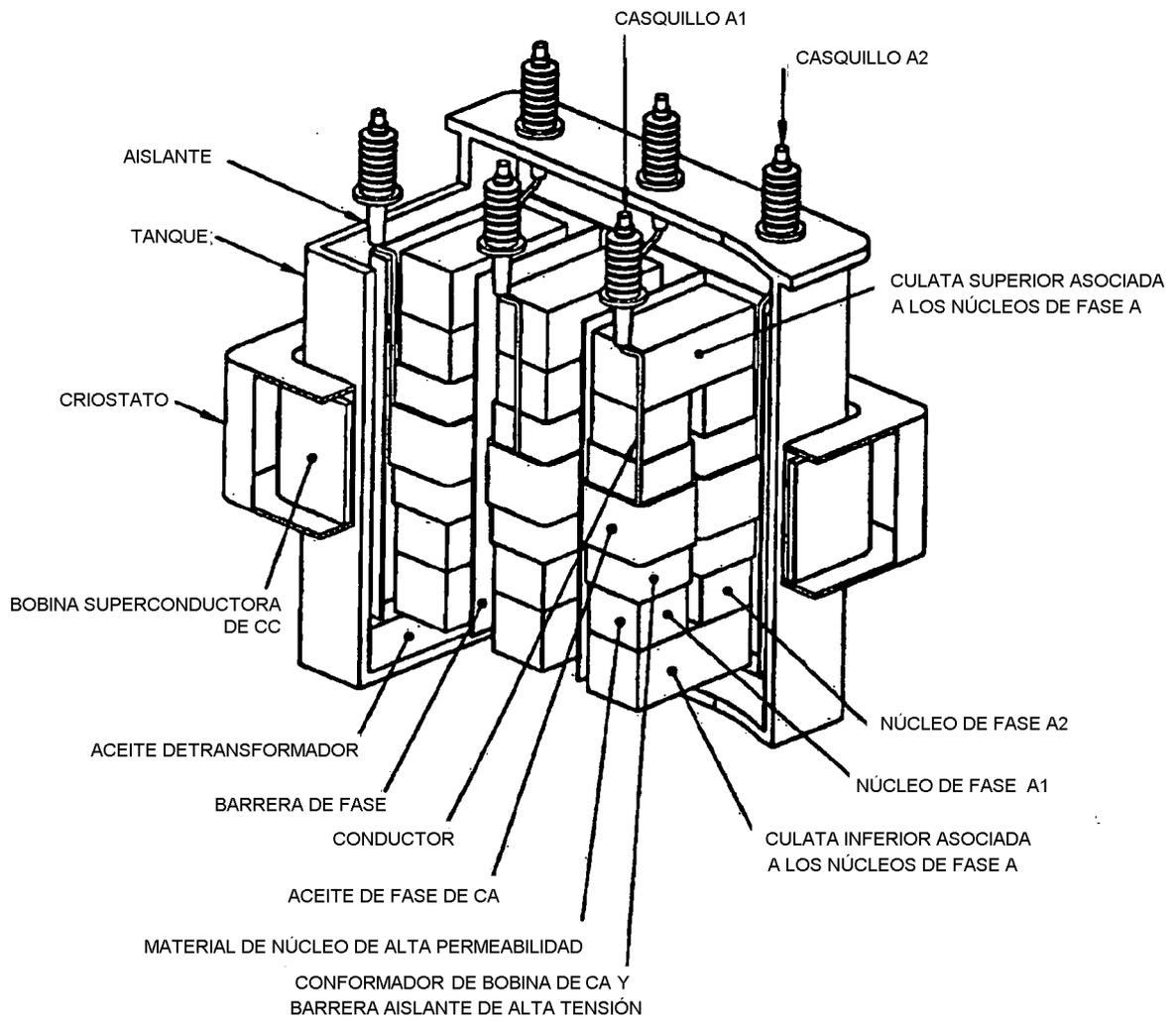


Figura 18.

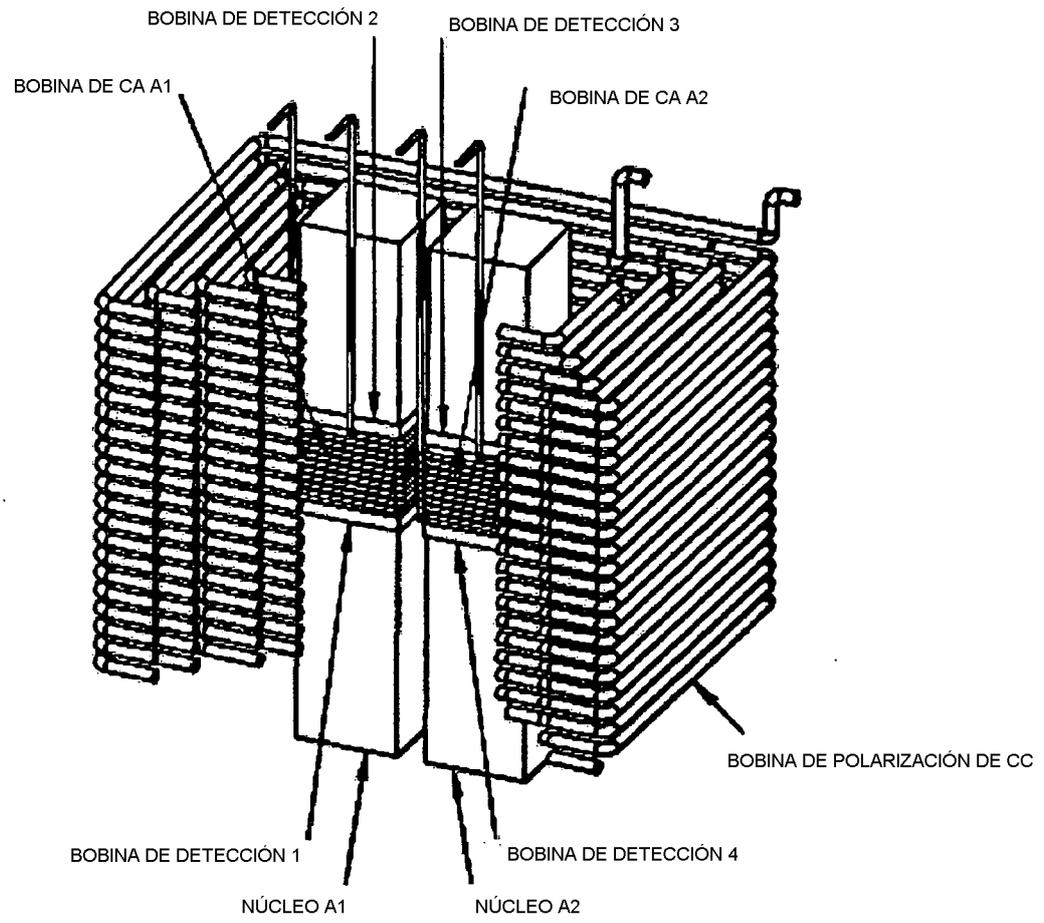


Figura 19.

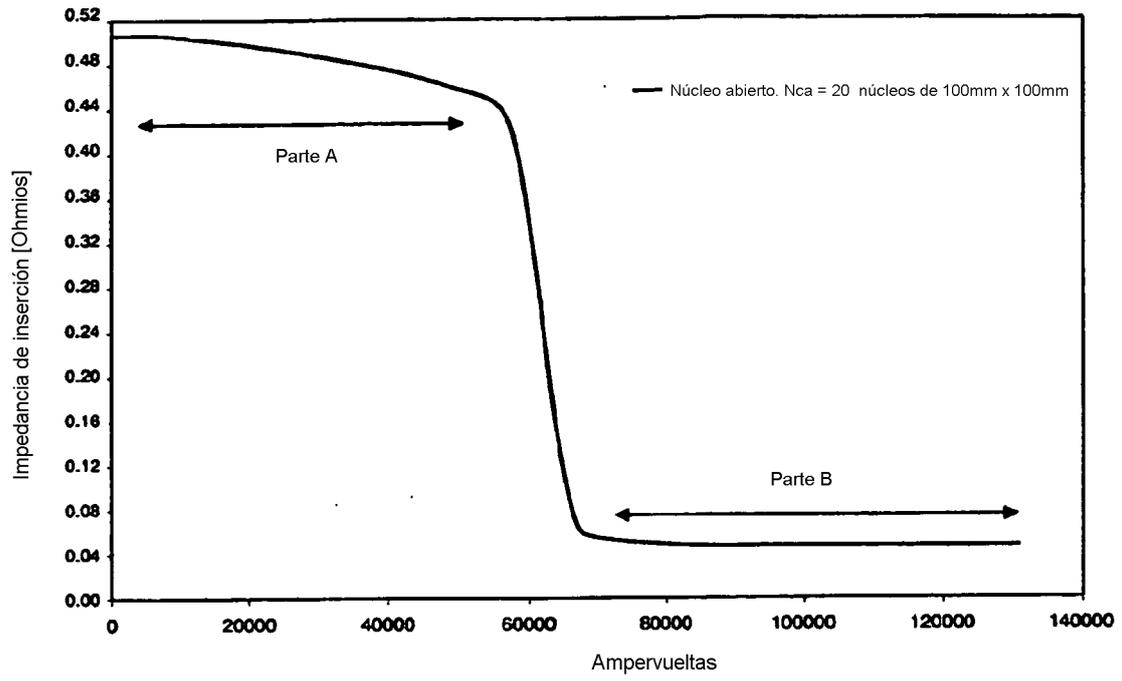


Figura 20.

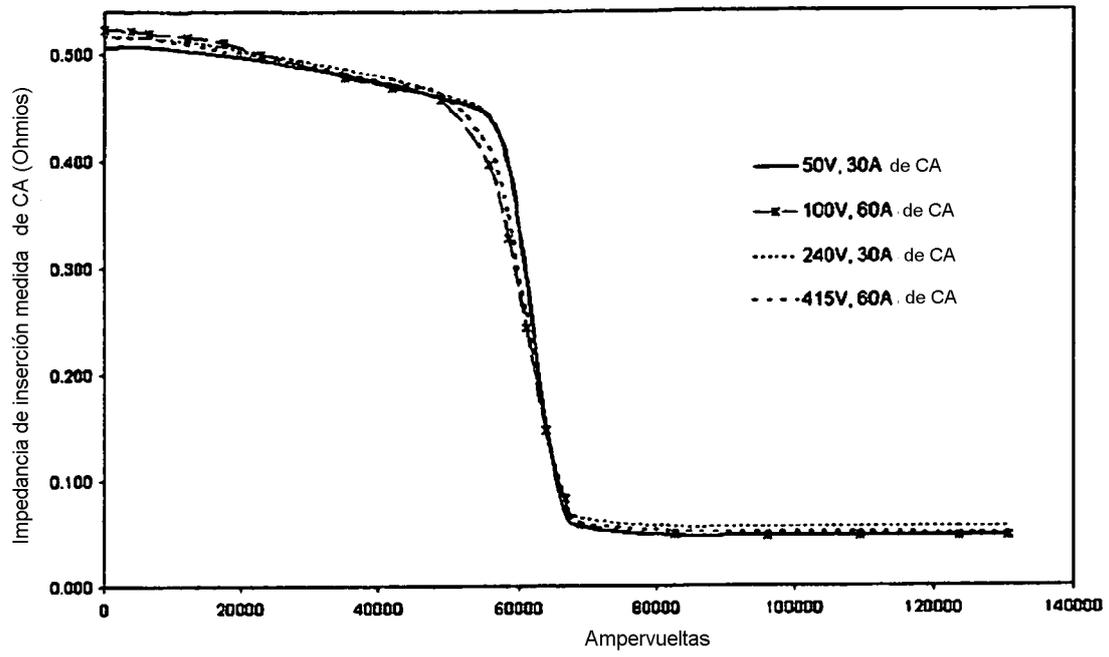


Figura 21.

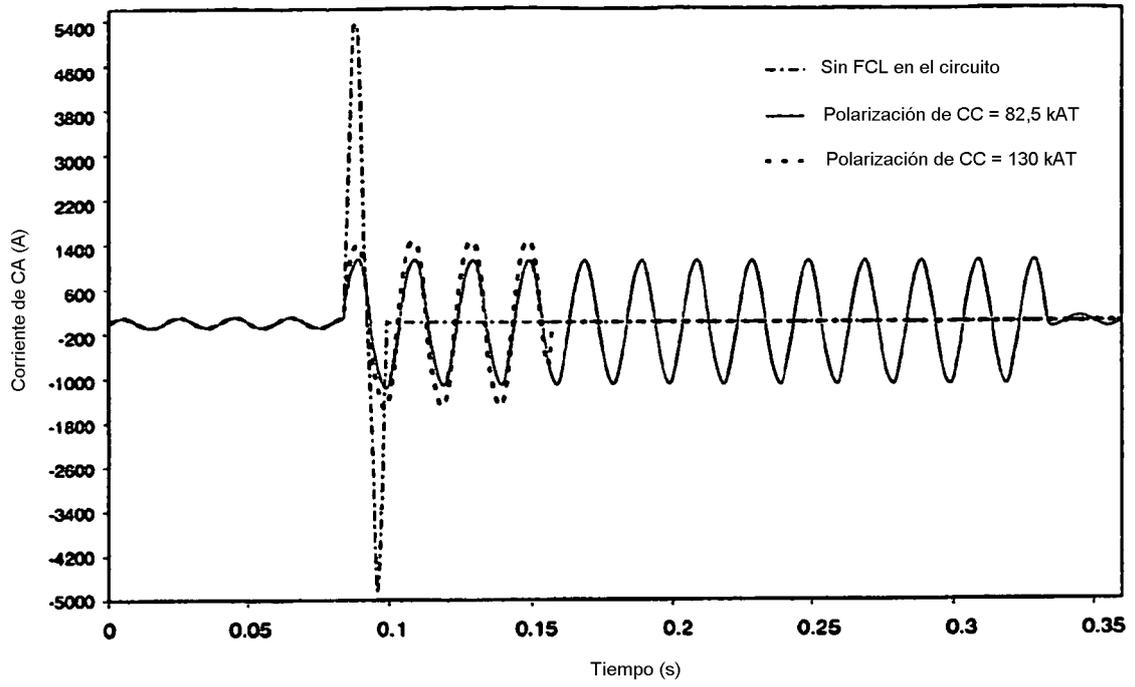


Figura 22.

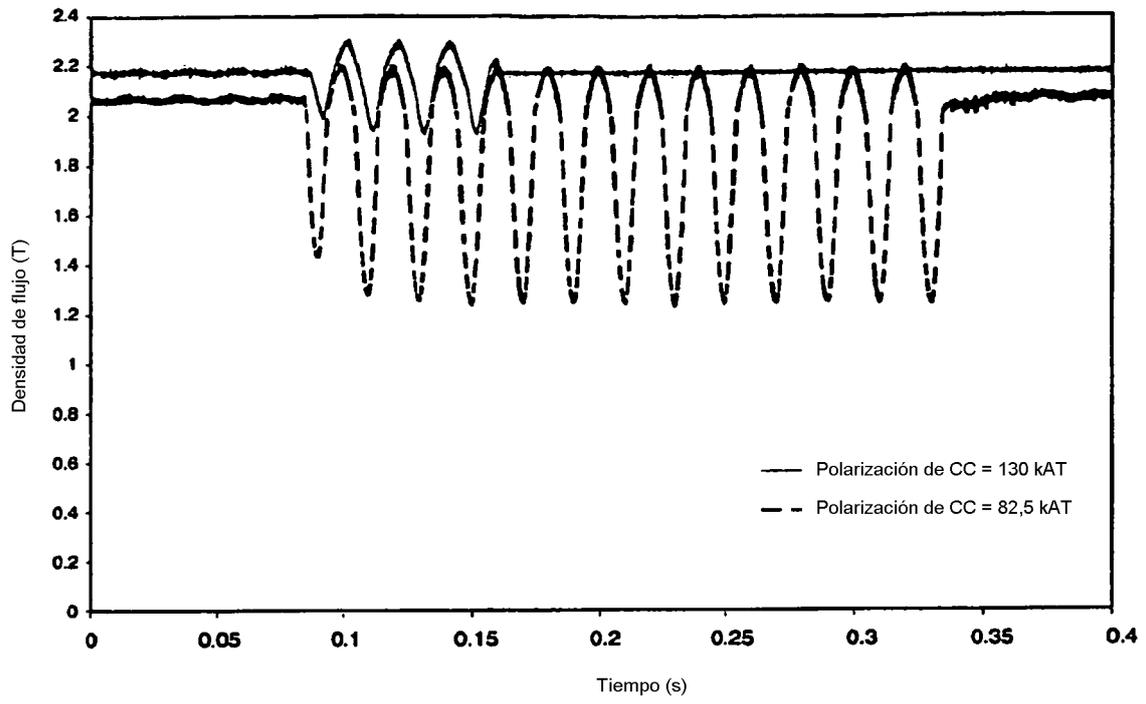


Figura 23.

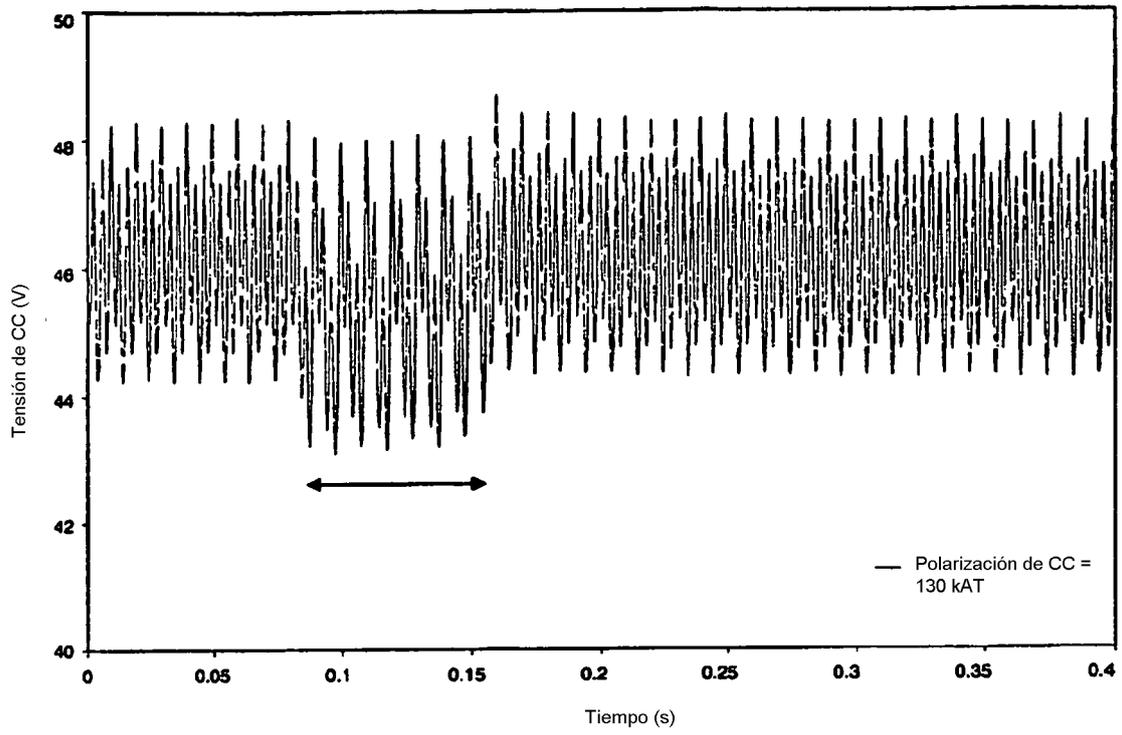


Figura 24.

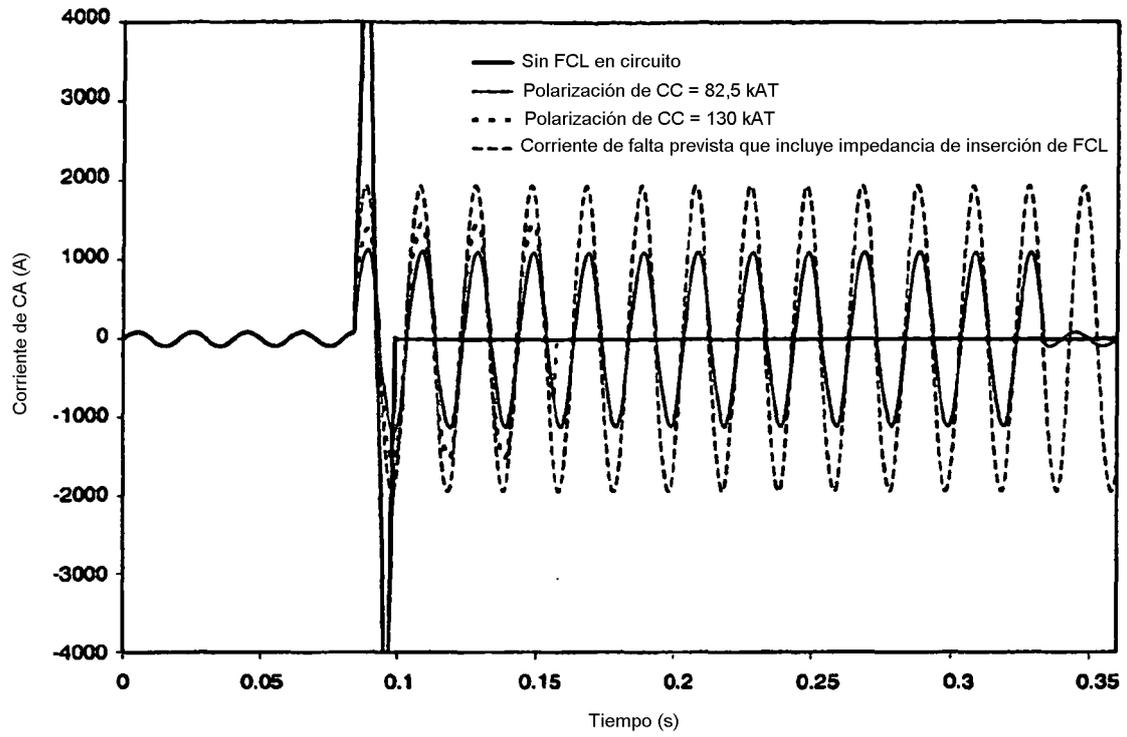


Figura 25.

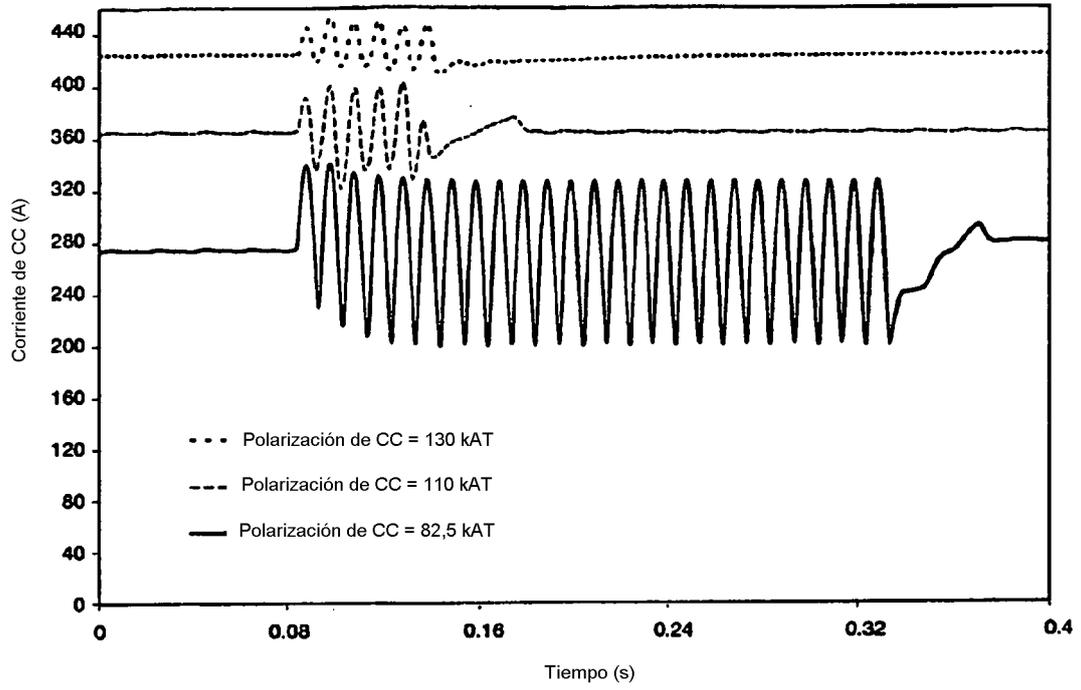


Figura 26.

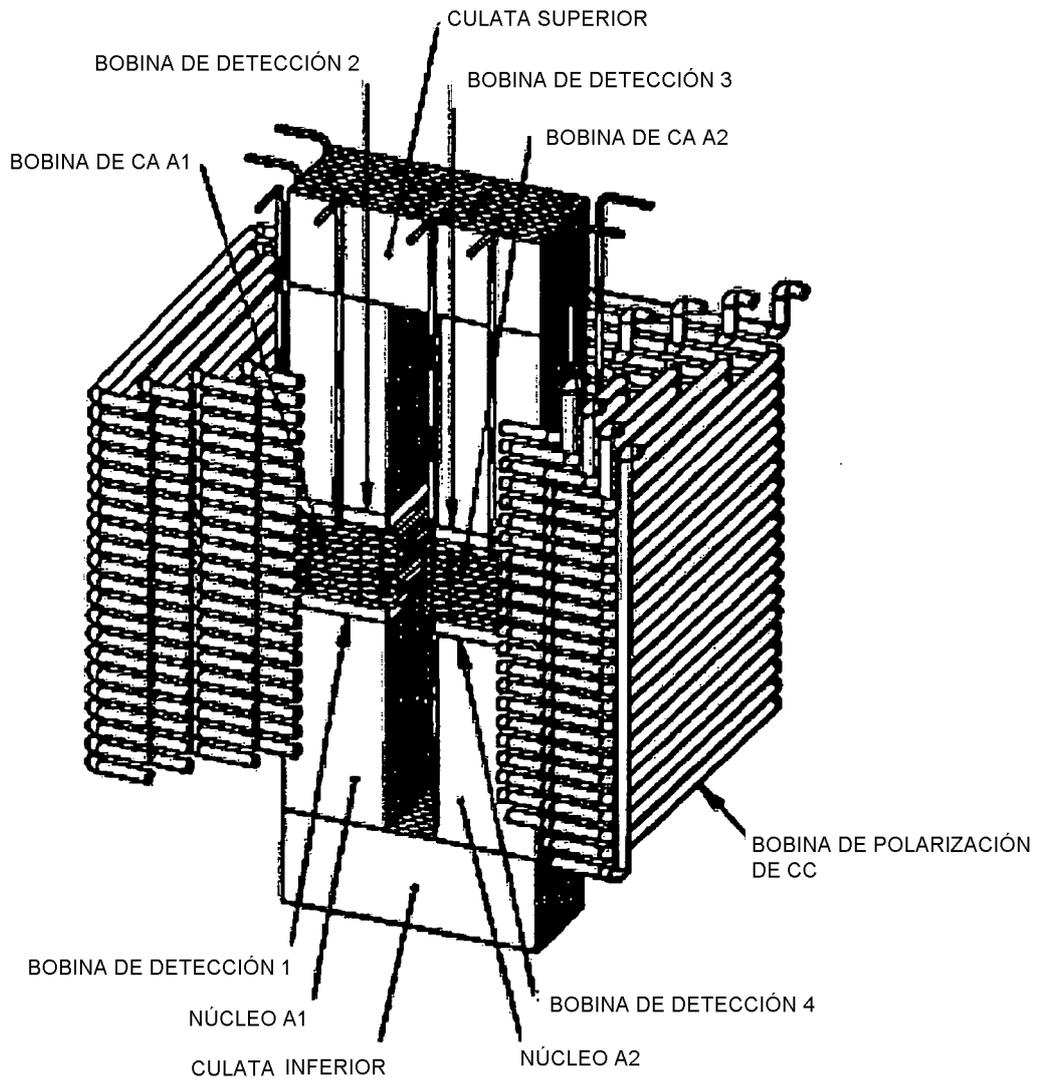


Figura 27.

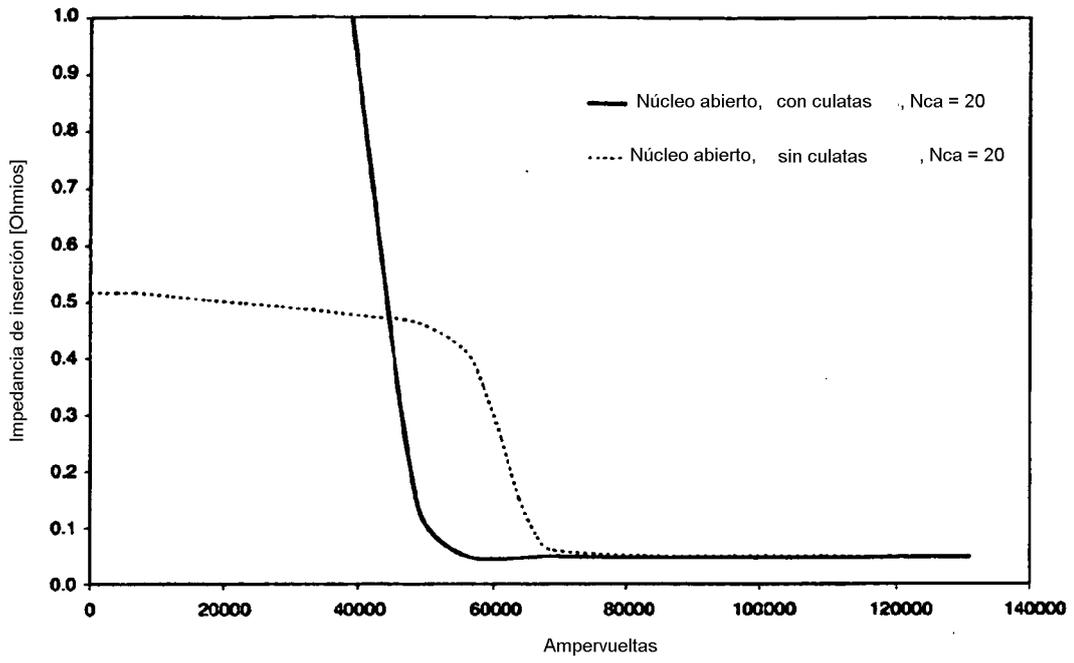


Figura 28

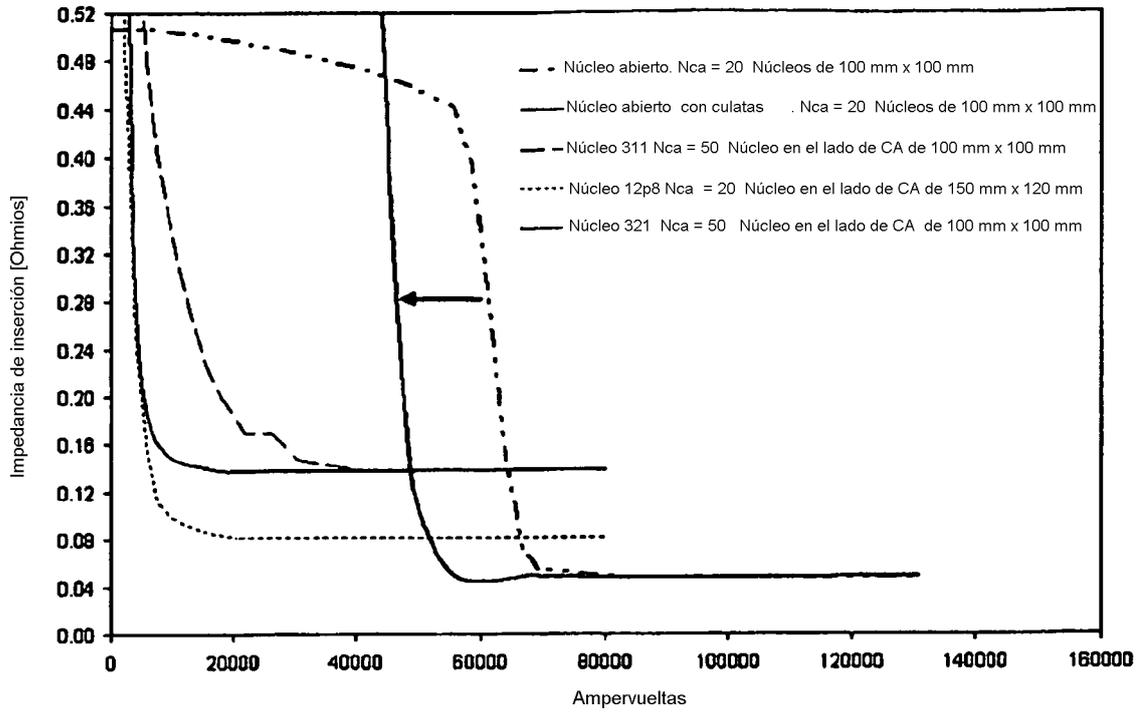


Figura 29.

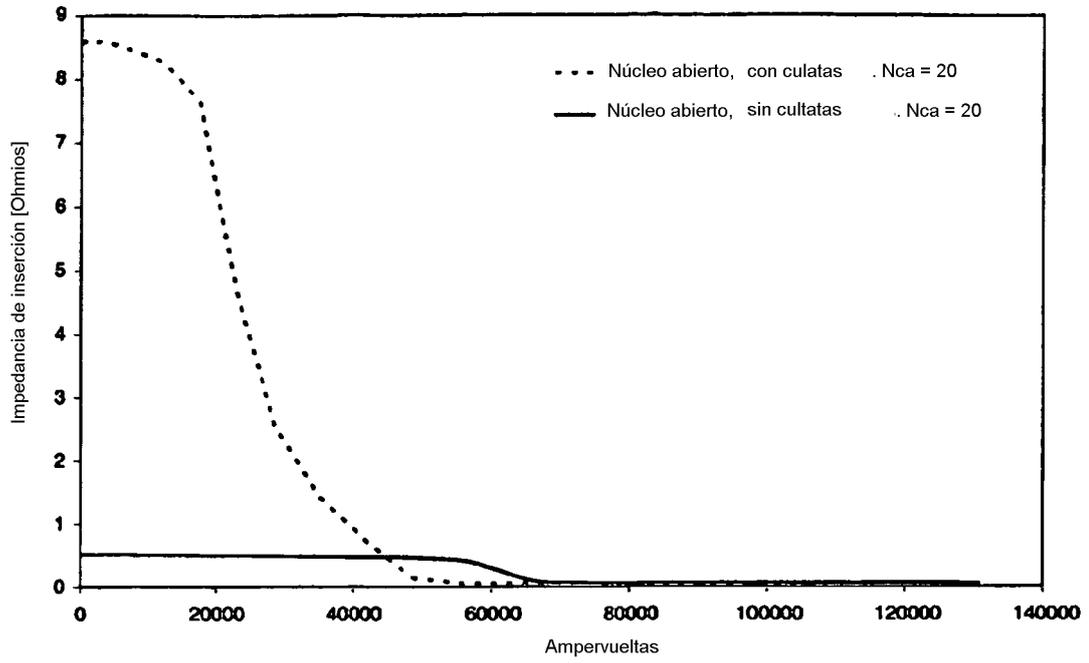


Figura 30.

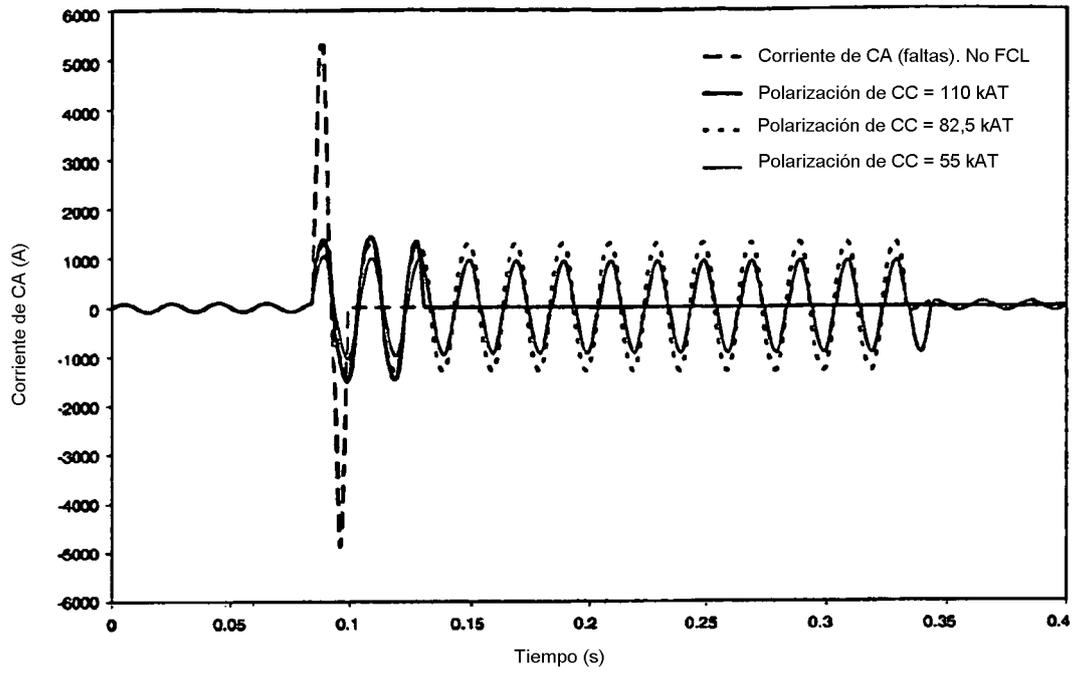


Figura 31.

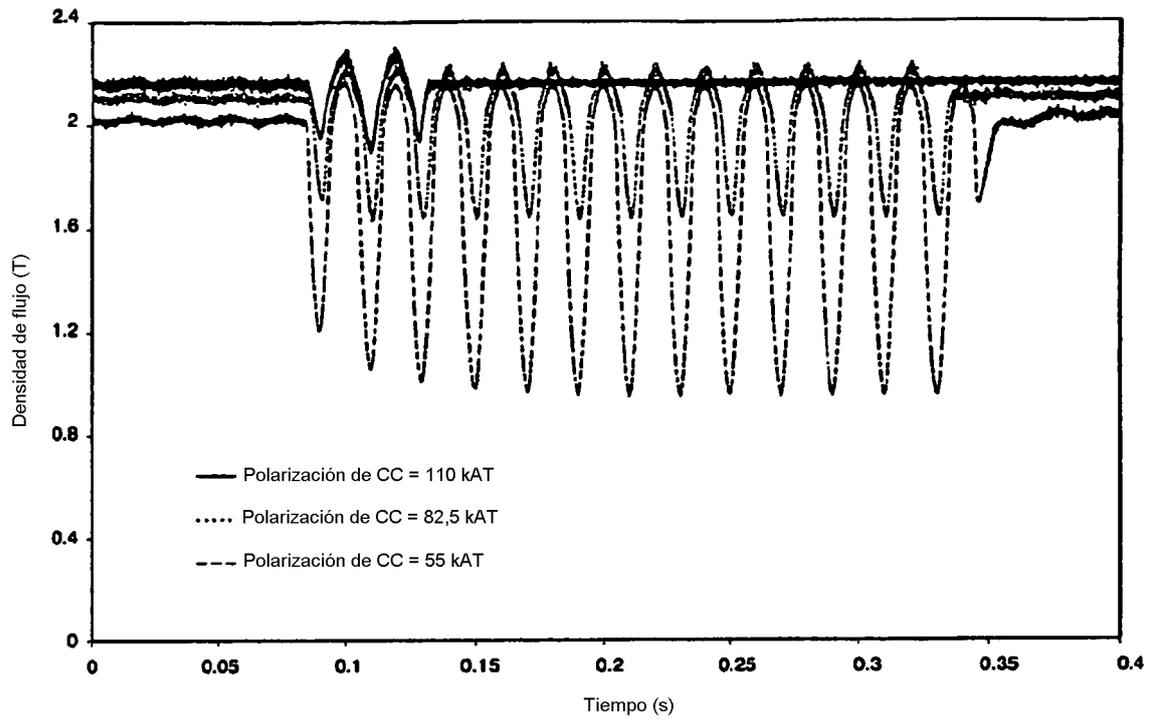


Figura 32.

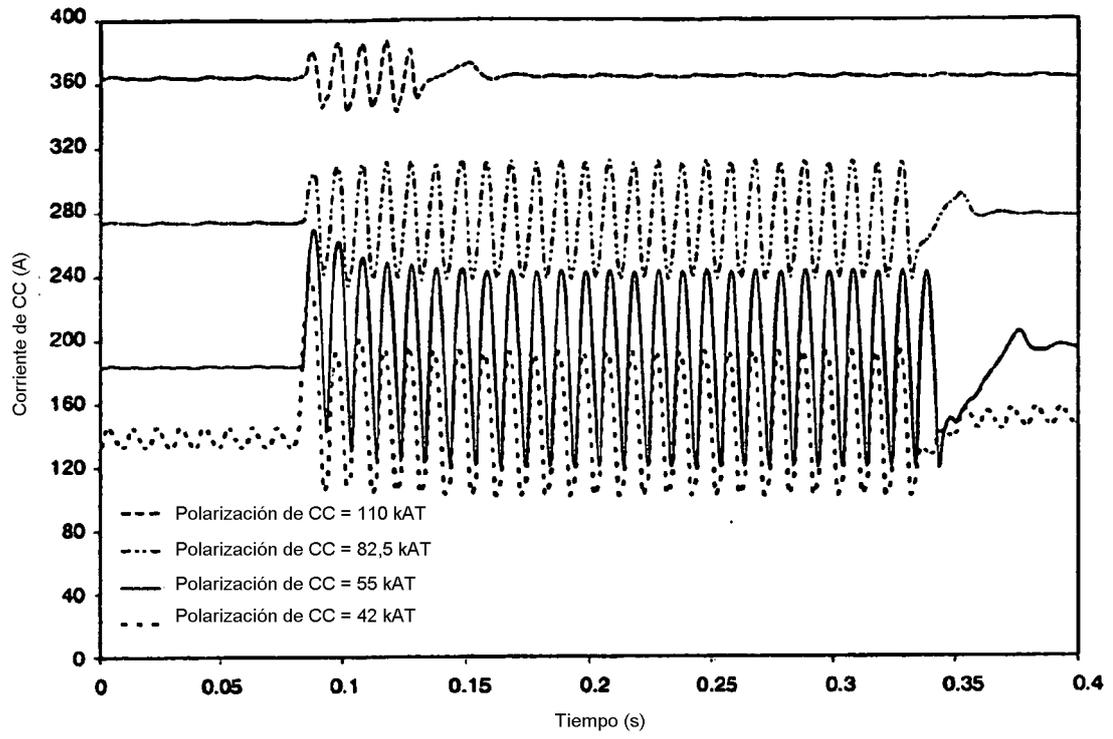


Figura 33.

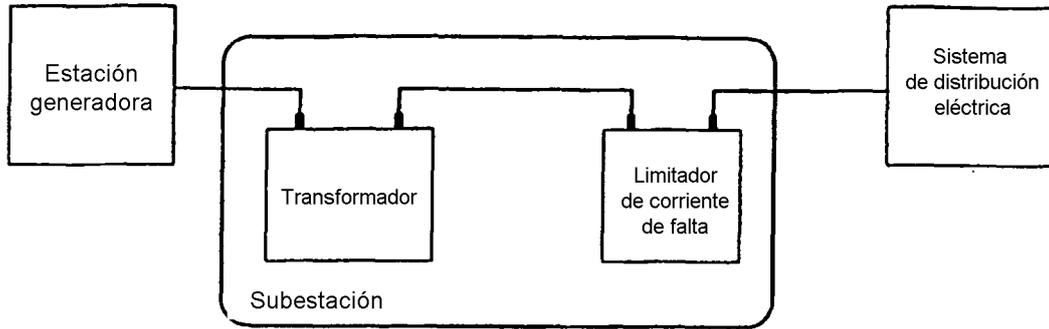


Figura 34

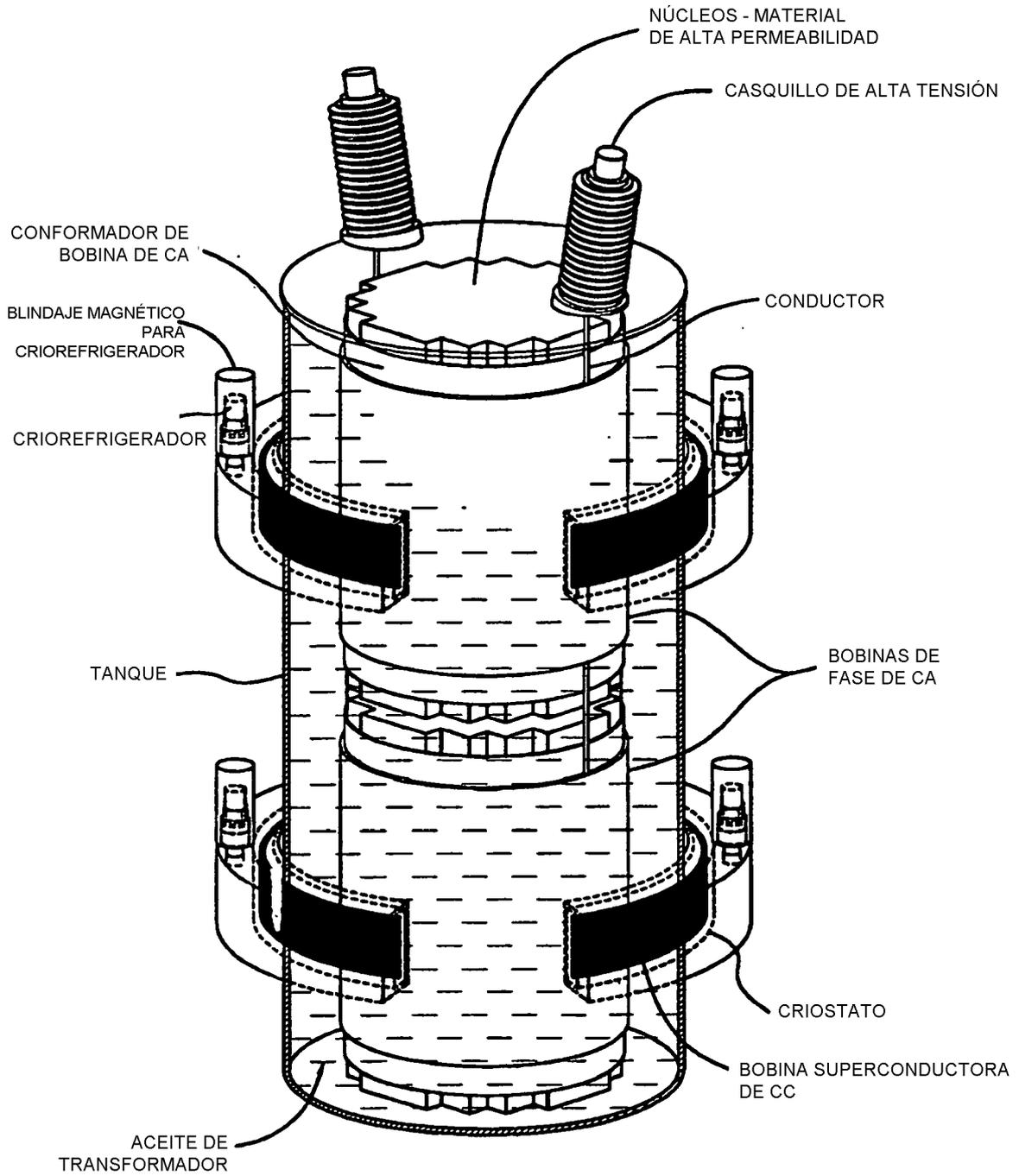


Figura 35

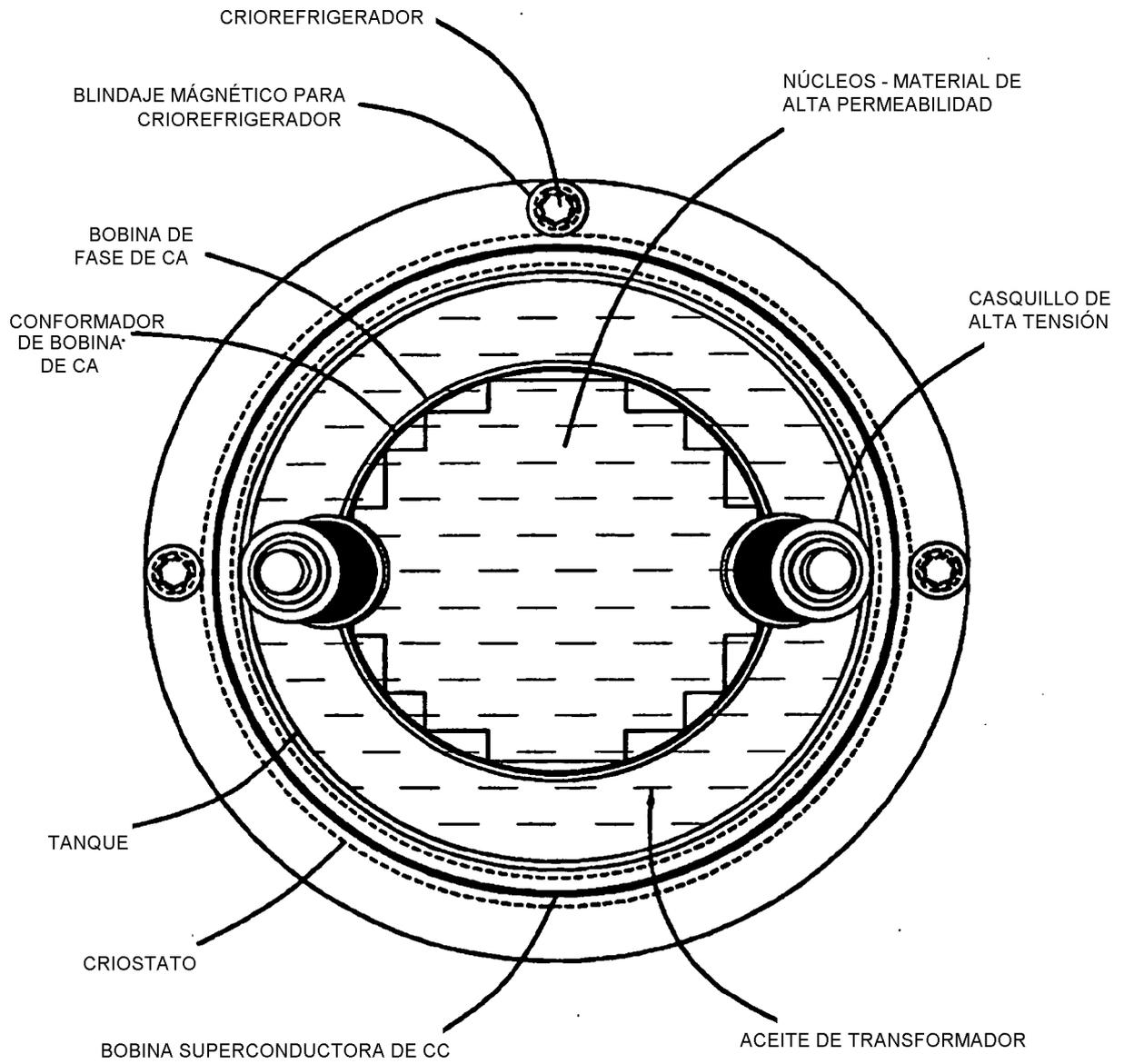


Figura 36

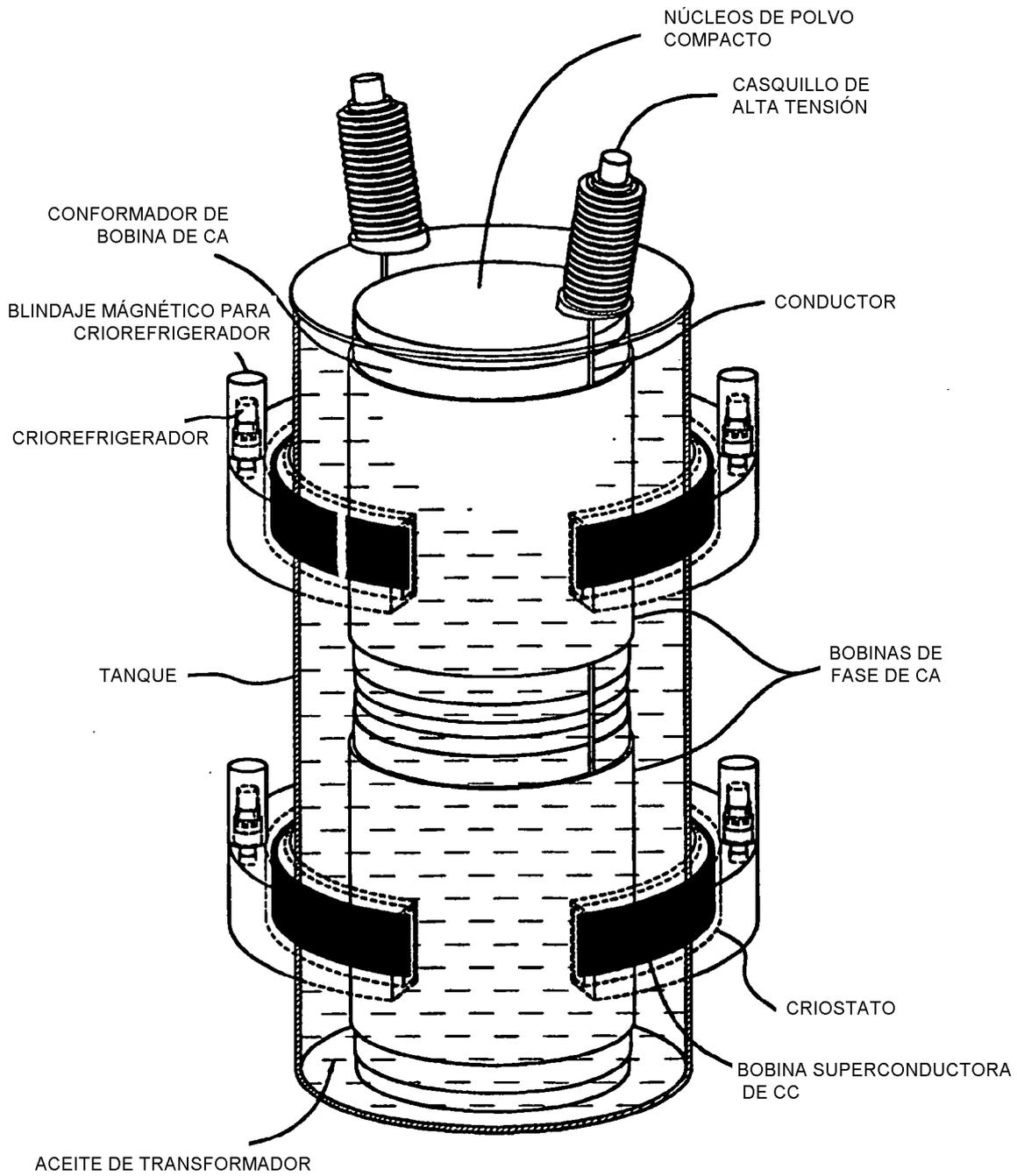


Figura 37

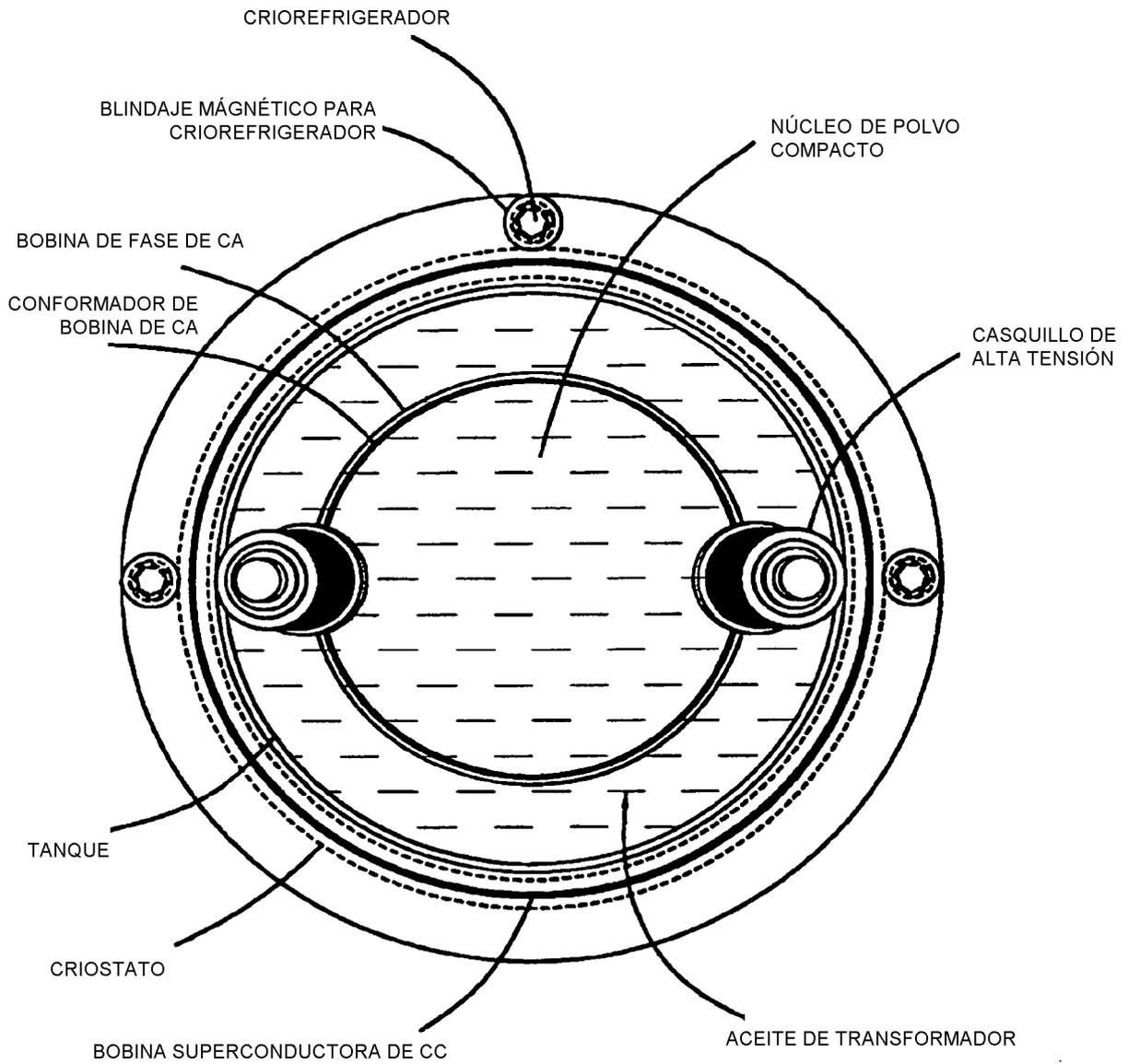


Figura 38

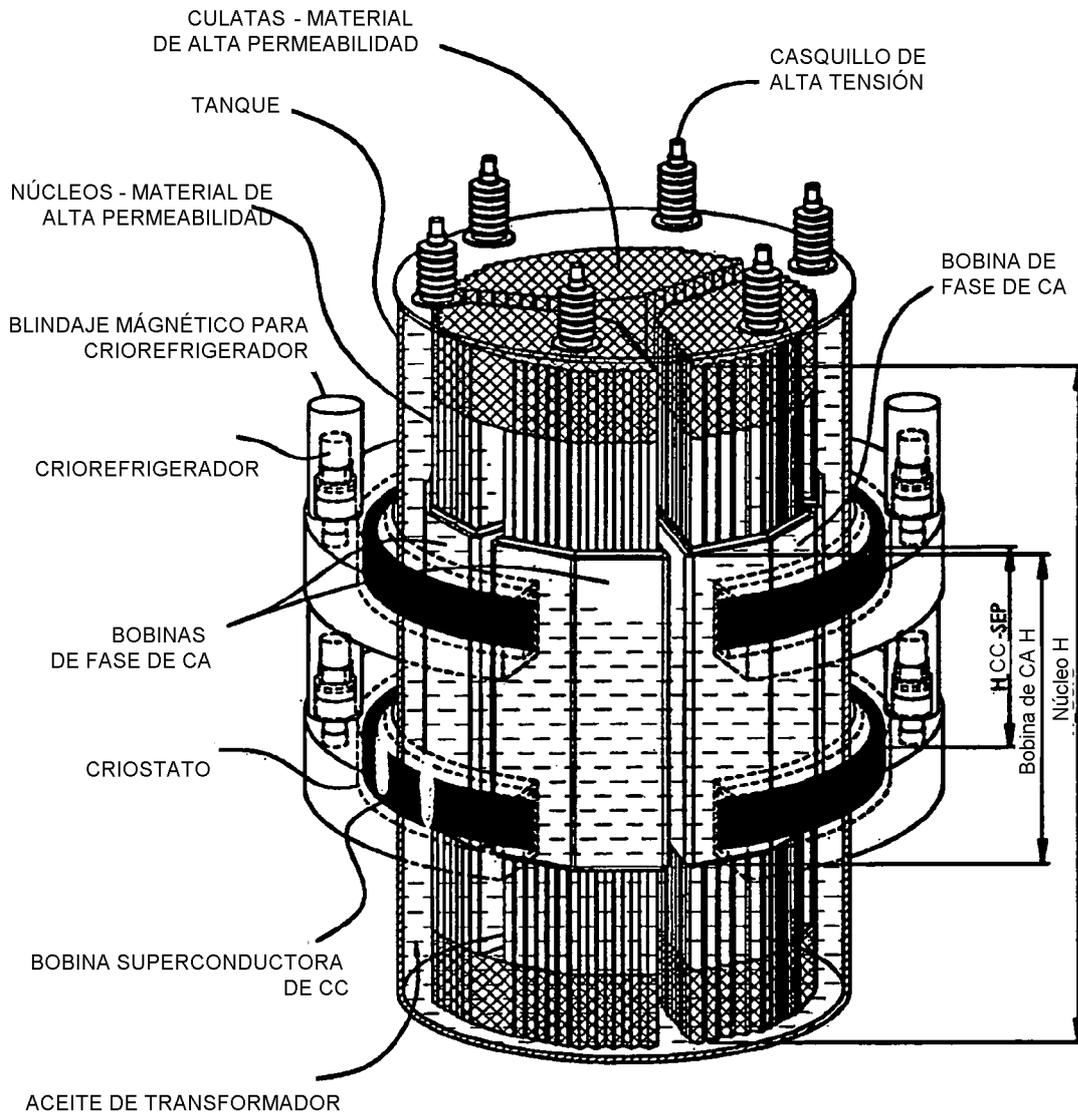


Figura 39

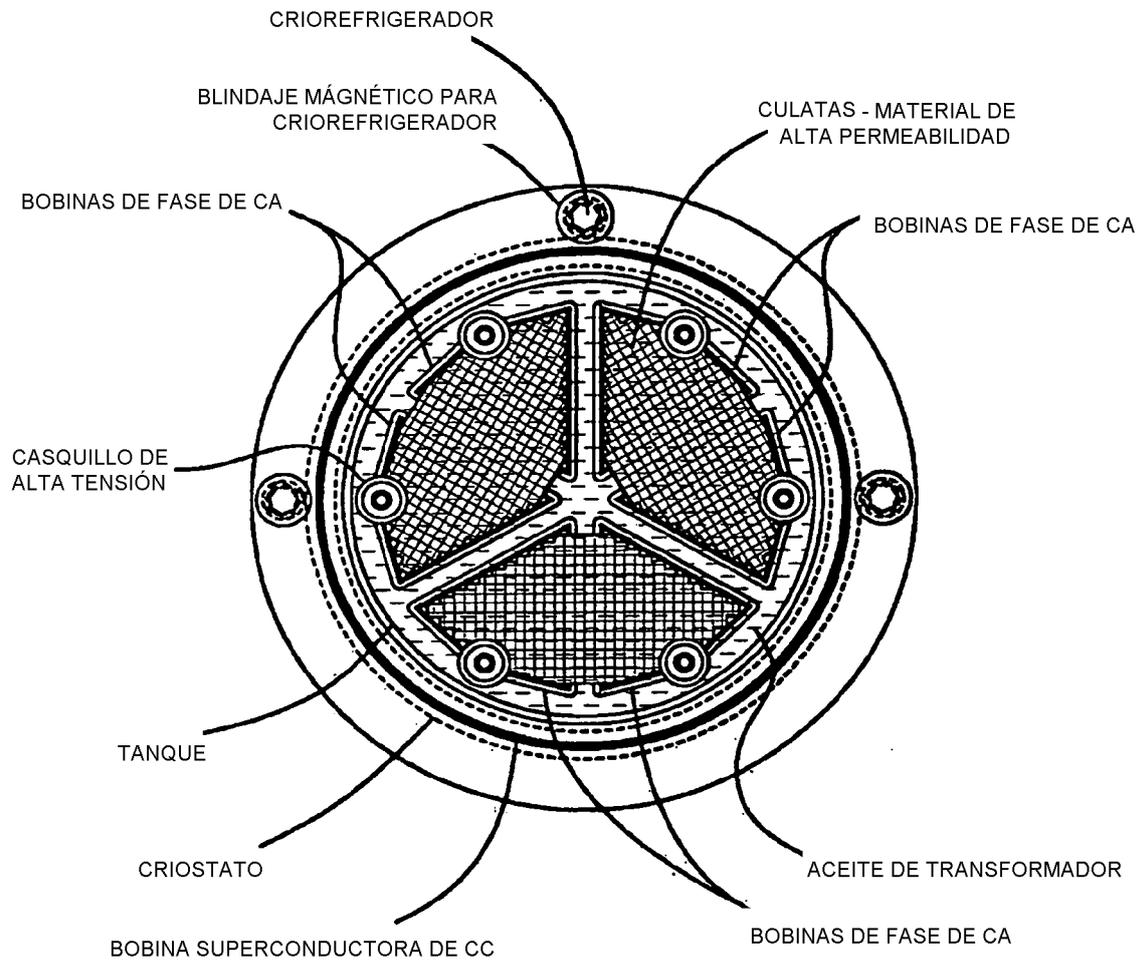


Figura 40

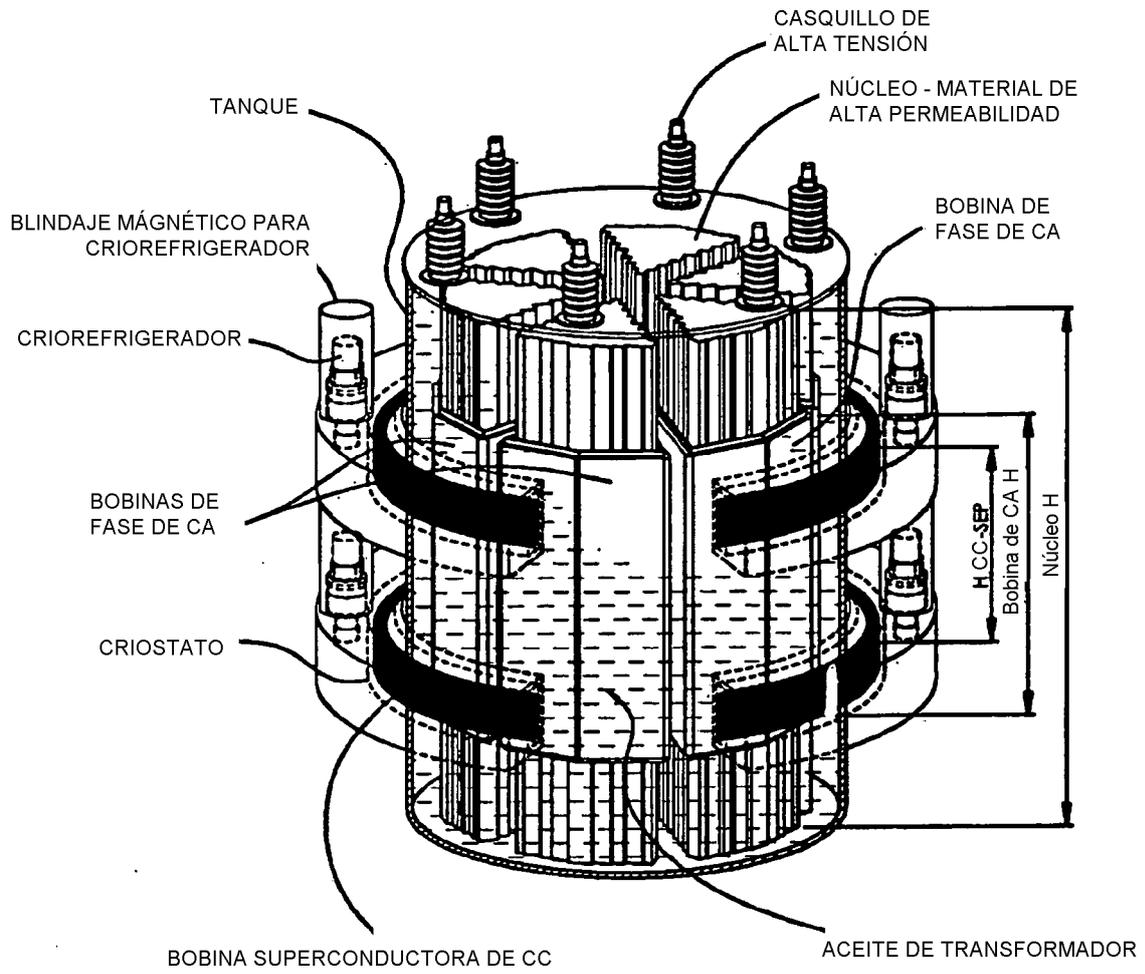


Figura 41

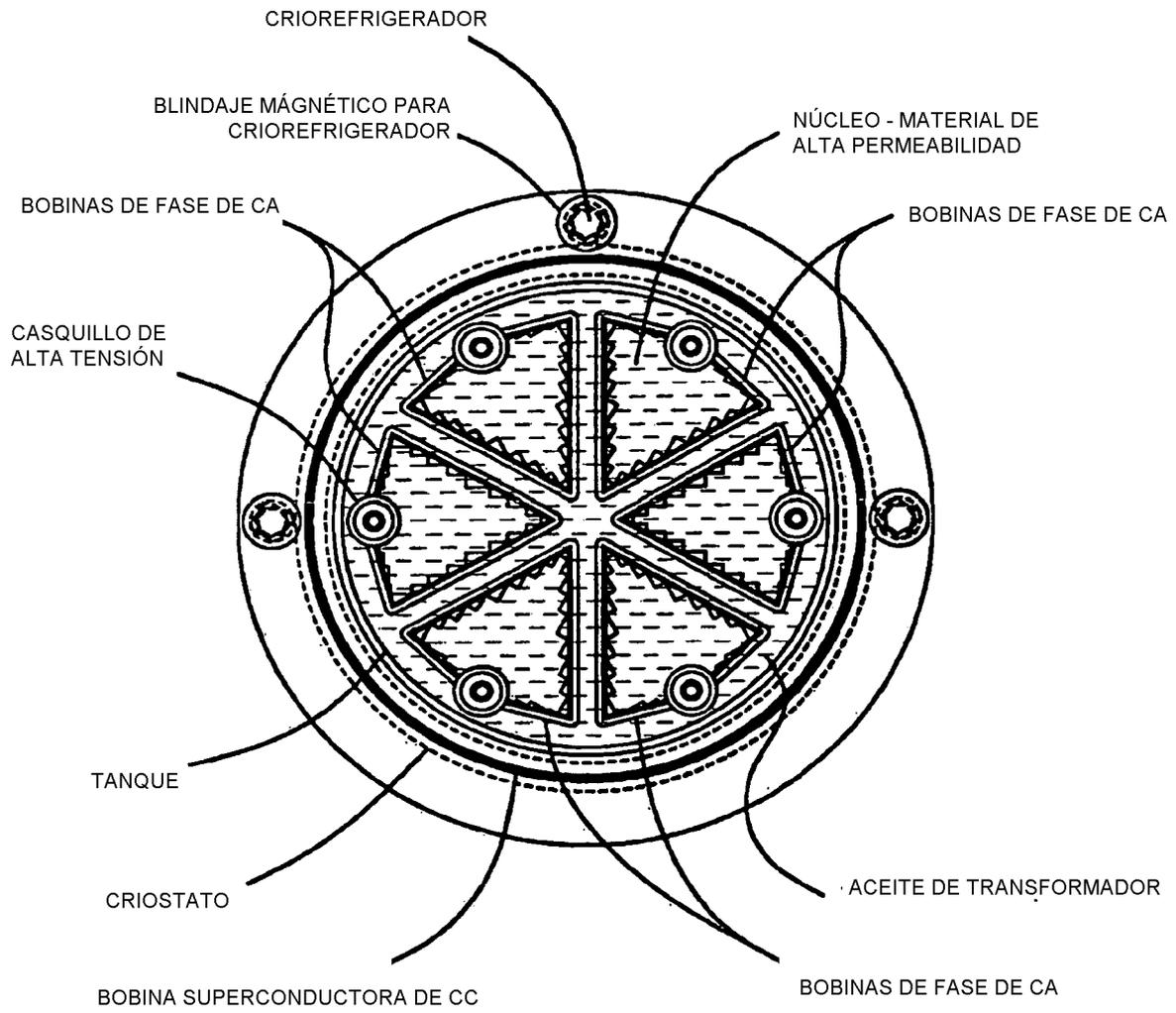


Figura 42

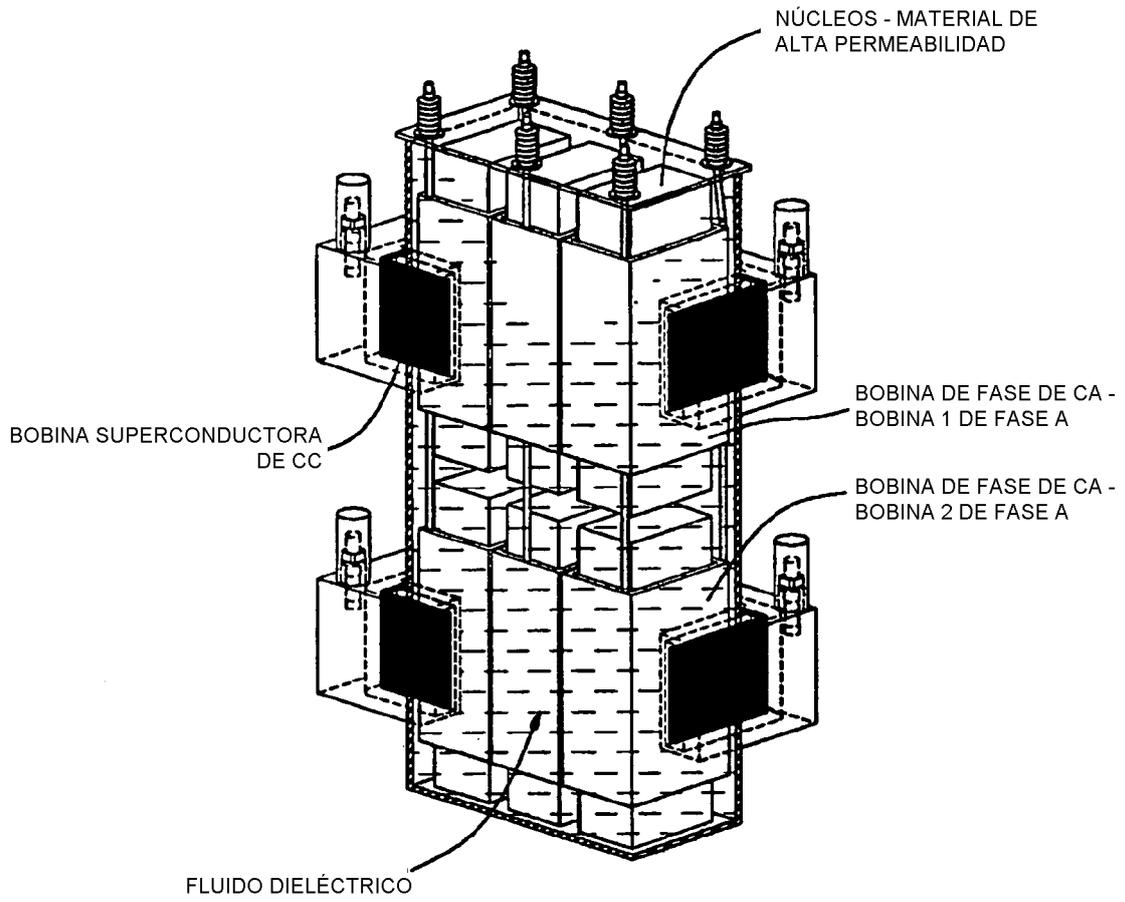


Figura 43

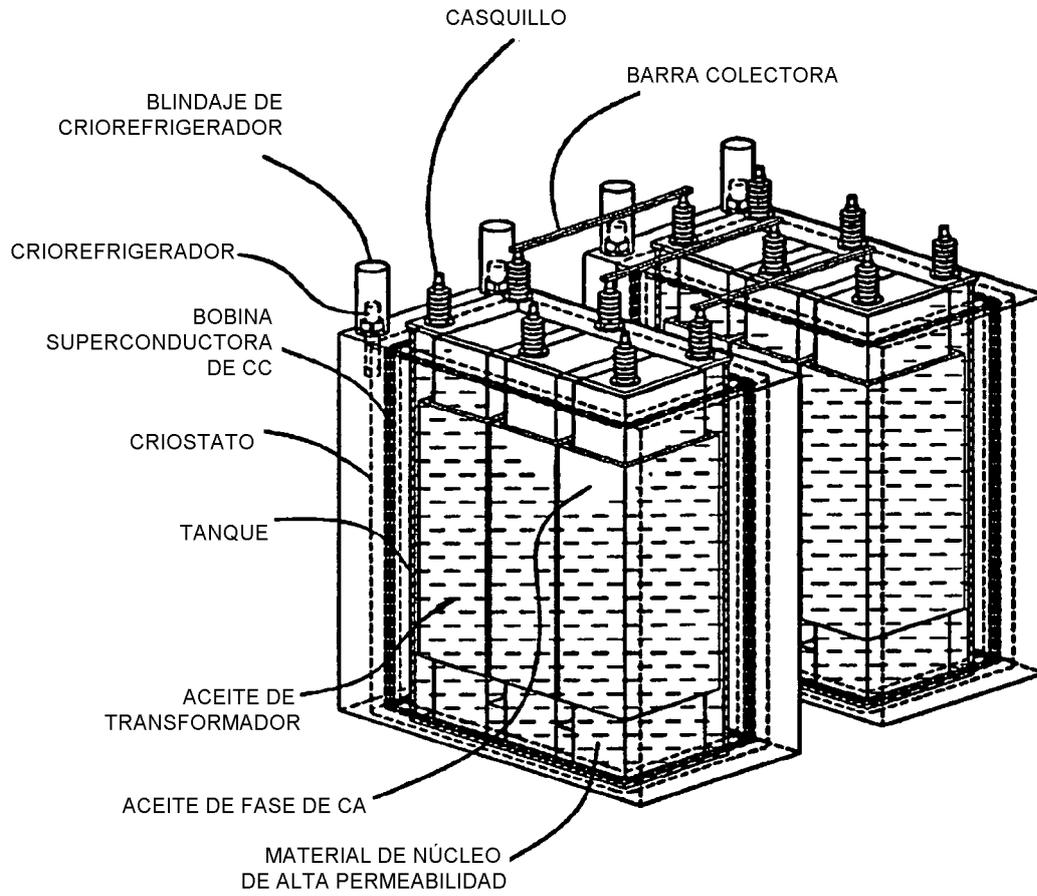


Figura 44

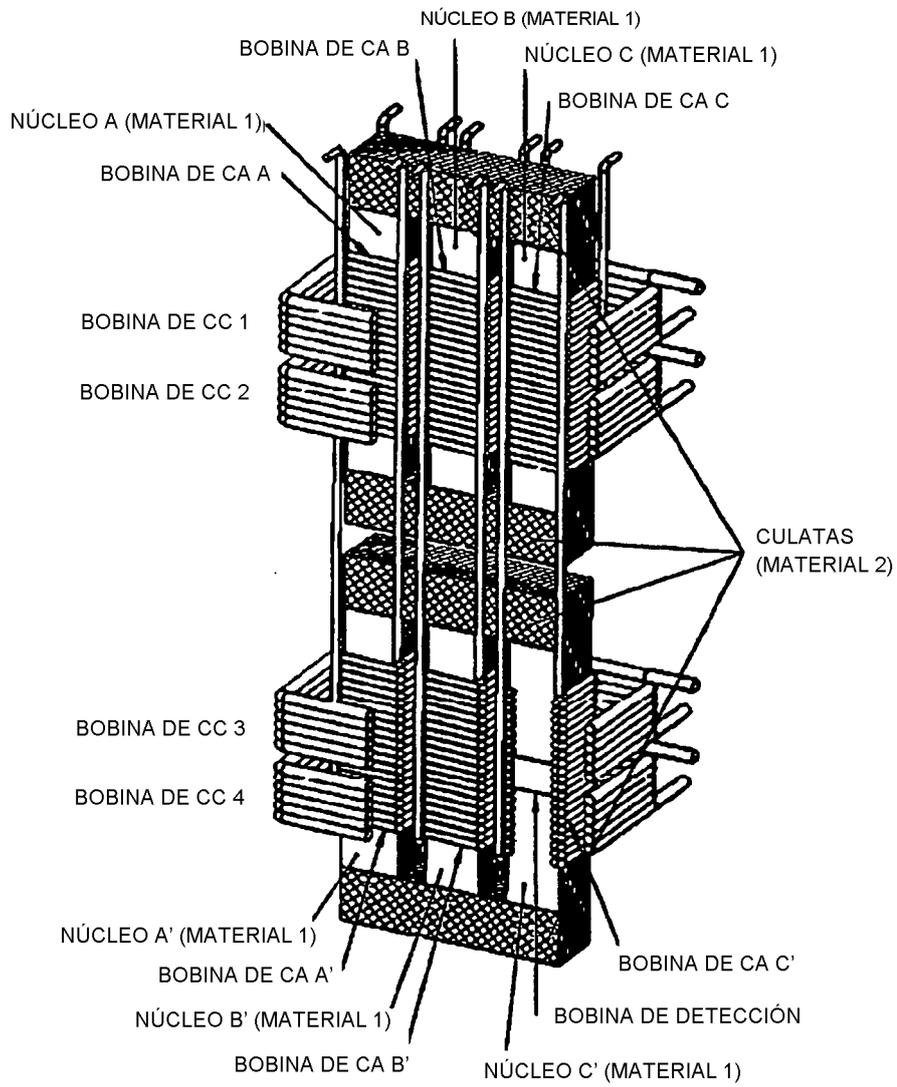


Figura 45