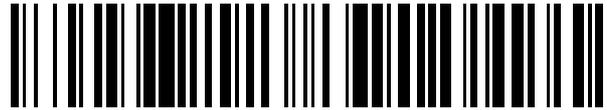


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 478 631**

51 Int. Cl.:

H01F 1/153 (2006.01)

H01F 38/28 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.10.2005 E 05814925 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.04.2014 EP 1805772**

54 Título: **Núcleo nanocristalino para sensor de corriente, contadores de energía de una y de doble fase y sondas de corriente que los incorporan**

30 Prioridad:

29.10.2004 FR 0411618

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

22.07.2014

73 Titular/es:

**APERAM ALLOYS IMPHY (100.0%)
1-5, rue Luigi Cherubini
93200 Saint Denis, FR**

72 Inventor/es:

**WAECKERLE, THIERRY;
SIMON, FABIEN;
ALVES, FRANCISCO;
SAVE, THIERRY y
DEMIER, ALAIN**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 478 631 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

Núcleo nanocristalino para sensor de corriente, contadores de energía de una sola fase y de doble fase y sondas de corriente que los incorporan.

5 La invención se refiere a un núcleo magnético utilizado para la fabricación de un componente inductivo, de tipo sensor de corriente.

10 En el caso de componentes para sensor de corriente y en particular para sensor de corriente alterna, que comprenden eventualmente una componente continua superpuesta significativa, es necesario disponer de núcleos que presenten unas permeabilidades reducidas para no saturar el núcleo, sin ser, no obstante, demasiado débiles para conservar una buena precisión de medición del sensor. Los rendimientos del sensor deben ser estables bajo campos de polarización elevados y en un intervalo de temperatura lo más grande posible y, en determinados casos, en una banda de frecuencia amplia.

15 Unos sensores de corriente de este tipo se aplican en particular en los transformadores de contadores de energía eléctrica, que al mismo tiempo aíslan todo el dispositivo de la red de carga en tensión y proporcionan la señal eléctrica que sirve para medir la energía.

20 Un transformador de corriente con conexión directa a la corriente de carga (de tipo 1 según la norma IEC 1026; a lo largo de todo el documento, cuando se hace referencia a esta norma, se hace referencia a su edición anterior, pero la más próxima al 30.10.2004) comprende una sola fase, que adopta la forma de un núcleo que acumula al mismo tiempo las funciones de transformador-aislador y de sensor de corriente para medir la energía. Tal como se puede observar en la figura 1, un transformador de este tipo designado en general por 1 en la figura 1, está constituido en general por tres partes:

- un circuito magnético tórico (no visible directamente en la figura) para minimizar las fugas magnéticas,
- 30 - un devanado primario 2 de N_1 espiras de resistencia R_1 que a menudo se reduce a un simple conductor que atraviesa el núcleo ($N_1 = 1$) y recorrido por una corriente i_1 ,
- un devanado secundario 3 de N_2 espiras de resistencia R_2 (del orden de 2500 en general) recorrido por una corriente i_2 .

35 Un sensor de corriente es muy preciso para medir la energía si el desfase entre corriente y tensión es muy pequeño, y si la relación entre las corrientes primaria y secundaria es lo más lineal posible. Esto se obtiene en particular mediante una inductancia magnetizante A_L lo más elevada posible, lo que implica que se dispone de un número muy grande de espiras secundarias N_2 , pero también de una permeabilidad μ lo más elevada posible. En efecto, haya o no una componente continua superpuesta I_{CC} a la corriente alterna a medir I_1 , el conjunto de estas corrientes no tiene que llevar el núcleo a la proximidad de la zona de saturación, ya que entonces la relación B-H ya no sería del todo lineal. Si se denomina ΔB a la extensión del intervalo de inducción en el que la relación B-H es aproximadamente lineal, el campo crítico que se debe superar so pena de saturación es entonces $\Delta B/\mu_{max}$ y la condición de no saturación que se deriva de ello es la siguiente:

$$45 \quad I_{max} = |I_{CC} + I_1| < N_1 \cdot (\Delta B/\mu_{max}).$$

Esto significa que cuanto más aumente la corriente máxima admisible a medir I_{max} , más se deberá disminuir la permeabilidad del material para escapar a la saturación.

50 En la práctica, para los calibres de medición más pequeños (de 5 a 50 A según la norma) a los que se superponen eventuales componentes continuas, se utiliza una estructura de sensor de una sola fase y un núcleo magnético de aleación amorfa a base de cobalto.

55 Para los calibres de corriente de carga superiores a 50 A, a los que se superponen eventuales componentes continuas, la norma recomienda una estructura de doble fase tal como la representada en la figura 2, con transformador de corriente en la parte delantera designado en general por 4, encargado de aislar y de eliminar la componente continua de manera similar al del caso anterior, y un sensor de corriente de alta sensibilidad designado en general por 5, en derivación del transformador. Como este último evita cualquier riesgo de saturación en el sensor, resulta muy interesante utilizar un núcleo magnético de permeabilidad muy alta.

60 Otra aplicación típica de estos sensores de corriente es el control de corriente de los componentes activos de potencia (IGBT, GTO, tiristor...) para los dispositivos de potencia media y alta. Este tipo de aplicación requiere que el sensor pueda medir corrientes que varían muy rápido y a menudo en el tiempo y, por tanto, que disponga de una gran dinámica de medición, que abarque un intervalo de frecuencia de medición lo más grande posible, normalmente de por lo menos 1 MHz. El sensor con mejor rendimiento es el que presenta la máxima precisión y

65

dinámica de medición para un volumen ocupado global lo más reducido.

Para dichos equipos, se utilizan estructuras de doble fase similares a la que se acaba de describir, con un transformador de corriente en la parte delantera de permeabilidad equivalente reducida y un sensor de corriente en derivación basado en un núcleo magnético de alta permeabilidad y gran estabilidad en frecuencia tal como un núcleo nanocristalino convencional de alta permeabilidad ($\mu > 20000$).

Los rendimientos exigidos para los núcleos de transformador de sensor de corriente expuestos, ya sea de componentes fuertes de corriente continua superpuesta (aplicación como contador de energía), ya sea de variaciones de corriente fuertes y rápidas (aplicación para la medición armónica de tipo sonda de corriente para el control de los componentes activos de potencia) son esencialmente los mismos y se pueden resumir de la siguiente manera:

- El núcleo del componente inductivo debe presentar una buena estabilidad térmica de sus propiedades magnéticas, lo cual permite en particular elevar más la temperatura límite de funcionamiento del componente y disponer de una precisión de medición poco dependiente de la temperatura de funcionamiento. Esta estabilidad en temperatura es normalmente del orden de algunos % de variación de permeabilidad entre -40°C y $+60^{\circ}\text{C}$.
- Debe presentar además un envejecimiento reducido en atmósferas que pueden superar los 100°C .
- La permeabilidad bajo el campo alterno del núcleo magnético debe estar limitada a un nivel de permeabilidad tal que el material no pueda saturarse bajo el efecto conjugado de la componente alterna fundamental, de sus armónicos eventuales (caso de la alimentación de un semiconductor de potencia) y de la componente continua superpuesta eventual. Para la utilización en un transformador utilizado en un contador de energía, se preferirá más particularmente una permeabilidad magnética relativa inferior a 4000, y preferentemente inferior a 3000 aunque manteniéndose superior a 200, incluso a 300.
- La solución magnética utilizada no debe comprender ningún entrehierro localizado, de manera que limite la sensibilidad a las radiaciones electromagnéticas parásitas. Esto permite asimismo evitar tener que utilizar un blindaje.
- Asimismo, es necesario buscar una inducción de saturación B_s que sea elevada, con el fin de miniaturizar el sensor y/o mejorar su precisión. Se preferirán en particular los núcleos que presenten una inducción de saturación B_s superior o igual a 1 T, incluso superior a 1,2 T.
- Para los transformadores de corriente destinados a trabajar bajo componente continua superpuesta, es deseable disponer de una "fuerte linealidad B-H", es decir una relación entre B y H lo más lineal posible en un intervalo importante de inducción ΔB : se pretende una variación máxima de μ en este intervalo de como mucho algunos %. En efecto, cuanto más elevado sea ΔB , con un intervalo de corriente de polarización I_{cc}^{max} constante, más se podrá aumentar la permeabilidad y por tanto la precisión del sensor, o bien más se podrán reducir el radio y el volumen del núcleo.
- Es deseable disponer de una permeabilidad eficaz local μ_{loc} , bajo componente de corriente alterna lo más independiente posible de la componente continua superpuesta H_{cc} : se denomina permeabilidad diferencial o local μ_{loc} a la derivada de B con respecto a H en el punto de funcionamiento B(H).
- El núcleo también debe presentar pequeñas pérdidas magnéticas para limitar el desfase entre corriente y tensión del sensor y por tanto aumentar la precisión.
- También es deseable que las propiedades magnéticas de los componentes inductivos sean poco sensibles a las exigencias externas, tales como las exigencias de revestimiento, de bobinado.
- Además, la dinámica en frecuencia de imantación debe ser buena, es decir que la frecuencia de "corte intrínseco alto" es elevada, y más particularmente por lo menos igual a 1 MHz sin blindaje del sensor. En el marco de la presente invención, se denomina frecuencia de corte de un material conductor a la frecuencia para la cual se obtiene el máximo de amplitud de μ , parte imaginaria compleja de la permeabilidad y que representa los efectos disipativos por corrientes inducidas.
- El núcleo debe ser lo más económico posible.

Para realizar transformadores de corriente, es habitual utilizar núcleos magnéticos tóricos de aleación de Fe-Ni con un 80% de níquel, pero estas aleaciones presentan una permeabilidad relativa que varía sustancialmente con el campo de polarización, si bien se mantiene siempre muy superior a 10000. Por tanto no están adaptados a los transformadores de corriente que trabajan bajo fuerte componente continua.

Se ha propuesto, en particular en el documento US nº 6.507.262 B1, utilizar una aleación nanocristalina a base de hierro del tipo Fe-Co-Cu-Si-B que puede no contener cobalto, que presenta una permeabilidad elevada, comprendida entre 12000 y 300000. Asimismo, se ha propuesto utilizar una aleación amorfa a base de cobalto que presenta una permeabilidad comparable. Estas dos soluciones que presentan la ventaja de presentar relaciones B-H muy lineales, adolecen del inconveniente de presentar permeabilidades muy elevadas que conducen a la saturación de núcleos magnéticos en cuanto la componente continua de la corriente a medir alcanza varios amperios.

Se ha propuesto también, en el documento WO 2004/088681 A2, utilizar una aleación nanocristalina del tipo Fe-Ni-Co-Cu-Si-B, de permeabilidad inferior a 15000.

Por otro lado, se conoce a partir del documento FR 2 823 507 A1 un núcleo realizado de una aleación nanocristalina del tipo Fe-Cu-Nb-Si-B, de permeabilidad inferior a 1000.

Se ha propuesto también utilizar núcleos magnéticos de aleación amorfa a base de cobalto que presentan una permeabilidad relativa de algunos millares regulada mediante recocido bajo campo transversal. Estas aleaciones que presentan la ventaja de presentar una permeabilidad no demasiado elevada, presentan no obstante el inconveniente de presentar una inducción de saturación inferior a 0,8 teslas, lo que no es favorable para la obtención de una buena precisión para el sensor. Además, estas aleaciones son sensibles al envejecimiento a partir de 100°C y el cobalto es un elemento muy caro.

Se ha propuesto también utilizar una aleación nanocristalina de Fe-Co-Nb-Si-B-Cu que contiene el 60% (atómico) de Co que permite regular la permeabilidad hasta valores de algunas centenas o algunos millares, si bien se conservan determinadas ventajas de las aleaciones nanocristalinas de Fe-Cu-Nb-Si-B, a saber la estabilidad en temperatura de los rendimientos, la débil remanencia y el débil campo coercitivo. Estas aleaciones presentan no obstante el inconveniente de presentar una inducción de saturación baja y contener gran cantidad de cobalto que es muy caro.

Por último, se han propuesto transformadores de corriente sin núcleo magnético (sensor de Rogowski) o con núcleos magnéticos constituidos por recipientes de ferrita. Estos sensores presentan el inconveniente de ser muy sensibles a los campos magnéticos exteriores que van a perturbar las mediciones. Para evitar estas perturbaciones, es necesario prever blindajes magnéticos muy caros.

Parece que ninguna de las soluciones conocidas es verdaderamente satisfactoria.

Por tanto, el objetivo de la presente invención es proponer un núcleo enrollado ferromagnético mejorado con respecto a los de la técnica anterior y que, en particular, no presente entrehierro, presente una permeabilidad magnética relativa regulable de manera precisa entre 200 y 4000, adecuada para satisfacer las necesidades de los sensores de corriente para contador de energía, tanto en conexión directa con estructura de una sola fase, como en conexión al transformador de corriente en estructura de doble fase, y adecuado para satisfacer igualmente las necesidades de las sondas de corriente para control dinámico de corriente de los componentes activos de los sistemas electrónicos, y ello ocupando el volumen más reducido posible, sin requerir el uso de un blindaje y que sea lo más económico posible.

Para ello, la invención presenta como objeto un núcleo enrollado nanocristalizado según la reivindicación 1.

La permeabilidad μ puede variar según la reivindicación 2.

En un modo de realización preferido, el contenido en níquel es inferior al 4,5%, lo que presenta la ventaja de conducir a un coeficiente de magnetostricción λ_s muy pequeño. En otro modo de realización preferido, el núcleo enrollado es según la reivindicación 3.

El núcleo según la invención presenta la ventaja de ser muy económico ya que no contiene cobalto.

Además, su permeabilidad eficaz local es muy próxima a su permeabilidad lineal. En efecto, los inventores han constatado que esta permeabilidad eficaz local μ_{loc} es tanto más próxima a la permeabilidad μ_{lin} correspondiente a la pendiente de un ciclo de histéresis principal, cuanto menor es la remanencia del ciclo de histéresis. Por tanto, se preferirán núcleos que presenten una remanencia B_r muy débil, normalmente inferior a 0,02 T.

Un segundo objeto de la invención está constituido por un dispositivo de medición eléctrica según la reivindicación 4.

El dispositivo de medición eléctrica es, por ejemplo, un contador de energía de una sola fase según la reivindicación 5.

En un modo de realización preferido, el contador de energía es según la reivindicación 6.

El dispositivo de medición eléctrica puede ser, igualmente, un contador de energía de doble fase que comprende un núcleo de transformador de corriente y un núcleo de medición, según la norma IEC 1036 para los calibres superiores

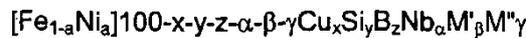
a 50 A, en el que el núcleo de transformador de corriente es un núcleo según la invención cuya permeabilidad μ está comprendida entre 200 y 1000, y preferentemente es inferior a 800. El dispositivo de medición eléctrica también puede ser un contador de energía según la norma IEC 1036 para los calibres superiores a 50 A, de una sola fase y que comprende un núcleo según la invención cuya permeabilidad μ está comprendida entre 200 y 1000, y preferentemente es inferior a 800.

Preferentemente, un contador de energía según la invención es según la reivindicación 7.

Por último, el dispositivo de medición eléctrica puede ser una sonda de corriente con gran dinámica de medición para controlar las corrientes en componentes activos de potencia en dispositivos de potencia media o alta, del tipo que comprende un núcleo de transformador de corriente y un núcleo de medición, siendo el núcleo de transformador de corriente un núcleo según la invención, cuya permeabilidad μ está comprendida entre 200 y 1000, y preferentemente es inferior a 800.

El núcleo magnético según la invención se adapta particularmente bien para su utilización en un transformador de corriente destinado a medir una corriente eléctrica alterna sobre la que se superpone una componente continua importante y/o componentes armónicas de cualquier orden y de amplitudes variadas.

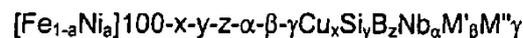
Este núcleo nanocristalino está constituido por una banda de material nanocristalino enrollada sobre sí misma, en forma de una bobina tórica, obtenida a partir de una cinta colada en estado amorfo, de composición atómica:



con $a \leq 0,3$, $0,6 \leq x \leq 1,5$, $10 \leq y \leq 17$, $5 \leq z \leq 14$, $2 \leq \alpha \leq 6$, $\beta \leq 7$, $\gamma \leq 8$, siendo M' por lo menos uno de los elementos V, Cr, Al y Zn, siendo M'' por lo menos uno de los elementos (C, Ge, P, Ga, Sb, In, Be). Para obtener la estructura nanocristalina, se somete la cinta amorfa a un recocido bajo tracción de cristalización, en estado desenrollado, en desplazamiento y bajo tensión en una dirección sustancialmente longitudinal axial de la cinta, de manera que la cinta se mantenga a una temperatura de recocido comprendida entre 500 y 700°C, durante una duración comprendida entre 5 y 300 segundos, bajo una tensión de tracción axial, y después se enrolla la banda nanocristalina, en la que la tensión de tracción axial está comprendida entre 2 MPa y 500 MPa con el fin de obtener una permeabilidad magnética comprendida entre 200 y 4000, y preferentemente entre 400 y 3000 para las aplicaciones previstas.

Es posible remitirse a la solicitud FR 2 823 507 para obtener detalles más amplios sobre el procedimiento de recocido bajo tracción.

De manera general, las aleaciones utilizadas para la fabricación de bandas amorfas de hierro-silicio presentan la siguiente composición atómica:



siendo $a \leq 0,3$, $0,6 \leq x \leq 1,5$, $10 \leq y \leq 17$, $5 \leq z \leq 14$, $2 \leq \alpha \leq 6$, $\beta \leq 7$, $\gamma \leq 8$,
siendo M' por lo menos uno de los elementos V, Cr, Al y Zn,
siendo M'' por lo menos uno de los elementos C, Ge, P, Ga, Sb, In, Be.

Estas aleaciones pueden presentar en particular la siguiente composición ponderal:

Fe_{72} a $_{77}$ Cu_1 Nb_3 $\text{Si}_{12,5}$ a $_{17}$ B_6 a $_{12}$, estando constituido el resto de la aleación esencialmente por impurezas inevitables.

El material se elabora en forma líquida y después se cuela con una gran velocidad de enfriamiento, en una instalación de colada de cintas amorfas de cilindro refrigerado de tipo clásico, de tal modo que se obtiene en la salida de la instalación de colada una banda amorfa enrollada en forma de bobina de espiras contiguas.

Durante el tratamiento, en el interior del horno y más particularmente en la zona de temperatura homogénea del horno, la banda que está tratándose y en desplazamiento se somete a una fuerza de tracción en su dirección longitudinal axial que se ajusta perfectamente en función de las características de la banda amorfa y se regula en un intervalo estrecho, durante el tratamiento de la banda en desplazamiento en el horno.

Además, la banda obtenida y enrollada en la salida del recocido ultrarrápido se puede desenrollar y después volverse a enrollar, lo que permite realizar núcleos magnéticos cuyas espiras están aisladas unas de otras, tal como se explicará más adelante. En cualquier caso, se realiza un tratamiento de recocido en desplazamiento o recocido ultrarrápido bajo tensión con un valor preciso de la fuerza de tracción, a una temperatura bien definida y a una velocidad de desplazamiento regulada.

De manera más general, en función de las características de la banda y de la temperatura del horno de entre 600°C y 700°C, y preferentemente entre 620°C y 690°C, el tiempo de mantenimiento de la banda a la temperatura de recocido puede estar comprendido entre 5 y 300 segundos, y preferentemente entre 10 y 60 segundos.

- 5 Es posible determinar una curva de escalonamiento del valor de la tracción para obtener un nivel de permeabilidad definido en la cinta de entre 200 y 4000.

10 Sin embargo, para obtener un núcleo en el que se limite la circulación de las corrientes inducidas y las pérdidas magnéticas, es necesario evitar la formación de contactos eléctricos entre las espiras, durante el enrollado del núcleo recocido. Con vistas a reducir las corrientes inducidas en el núcleo y las pérdidas magnéticas, puede ser necesario, según las aplicaciones previstas para el núcleo, depositar o formar una capa de aislamiento eléctrico sobre la banda para aislar las espiras sucesivas unas de otras. Por ejemplo se puede depositar de manera continua, sobre la banda tras el recocido, una sustancia mineral con un grosor de una décima de micrómetro a algunos micrómetros. Para ello, es posible desenrollar la banda de la bobina obtenida en la salida de la instalación de recocido y volverla a enrollar bajo tensión mecánica reducida, depositando eventualmente sobre la banda desenrollada, un material de aislamiento eléctrico antes de volver a enrollarla, con vistas a aislar unas de otras las espiras sucesivas del núcleo.

20 De manera general, las condiciones de cristalización de la banda en el interior del horno en recocido dinámico bajo tensión son tales que la banda comprende por lo menos el 50% en volumen de nanocristales cuyo tamaño está comprendido entre 2 y 20 nm. Los diferentes cristales están separados entre sí por la matriz constituida por la fracción de la aleación que se mantiene amorfa.

25 El núcleo magnético según la invención presenta la ventaja de presentar un bajo coeficiente de magnetostricción. Debido a ello, sus propiedades magnéticas no se modifican, cuando se realizan operaciones de revestimiento, de impregnación, de bobinado, de adhesión... que se traducen en esfuerzos ejercidos sobre el núcleo. Así, por ejemplo, cuando se reviste un núcleo de la invención, su permeabilidad lineal varía en menos del 5%, en particular cuando se mide a 20°C.

30 El núcleo magnético puede ser redondo, ovalado o cuadrado sin entrehierro.

La figura 1 es un esquema básico de un contador de energía de una sola fase.

35 La figura 2 es un esquema básico de un contador de energía de doble fase.

La figura 3 y la figura 4 son diagramas que proporcionan respectivamente los ciclos de histéresis de saturación ($H_{max} = 20$ Oe) y lineal ($H_{max} = 1$ Oe) de un núcleo.

40 Las figuras 5 y 6 son curvas que indican la razón de la permeabilidad magnética para una corriente (o campo H) que presenta una componente continua (o campo H_{cc} correspondiente en el caso de la figura 6 o 7) no nula con respecto a la permeabilidad magnética para una corriente (o campo H) que presenta una componente continua nula, para diferentes materiales.

45 La figura 7 es una curva que indica la permeabilidad de un núcleo en función de la temperatura.

La figura 8 representa las curvas (permeabilidad/amplitud de la componente continua superpuesta) para tres núcleos realizados a partir de la misma banda amorfa.

50 La figura 9 representa la estabilidad de μ en función de la temperatura para un núcleo de recocido ultrarrápido según la invención y para uno amorfo a base de cobalto.

A modo de ejemplo, se ha realizado la cristalización en nanocristales en la matriz amorfa de una banda amorfa de composición $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{15,5}B_7$, mediante el procedimiento ya conocido, aplicando una tracción de 50 Mpa durante el paso entre el desenrollador y el enrollador y con un paso por la parte del horno que se encuentra a 655°C durante 35 segundos. La banda amorfa estaba previamente aislada mediante el paso por un baño de metilato de magnesio. Tras volver a enrollarse para dar un núcleo de diámetro interior de 20 mm, una caracterización mediante método flujométrico en corriente continua muestra (figura 4) que el ciclo de histéresis de saturación (campo máximo aplicado de 20 Oe) es muy lineal en su parte correspondiente a un campo que va hasta 6 o 7 Oe: por tanto, si se restringe el campo máximo aplicado (alterno y/o continuo) por debajo de los 6 o 7 Oe, como por ejemplo 1 Oe, el material sólo trabaja en ciclo de histéresis extremadamente lineal y delgado (figura 4) lo que corresponde al ideal de un sensor de corriente.

La remanencia es tan débil que es difícil que proporcione un valor diferente de 0, teniendo en cuenta la imprecisión de medición. En todo caso es cierto que es inferior a 0,02 T. El campo coercitivo de 21 mOe también es muy débil y permite pensar que las permeabilidades locales μ_{loc} (también denominadas diferenciales) medidas a 10 kHz con componente continua superpuesta H_{cc} estarán muy próximas a μ_{lin} y serán muy estables en función de H_{cc} . Esto se

verifica mediante las curvas representadas en las figuras 5 y 6 en las que se observa, mediante comparación con polvos de FeNi compactados (MPP) y aleaciones nanocristalinas a base de cobalto (Hitperm), que la permeabilidad de los núcleos de la invención (SAN) sigue siendo mucho más estable cuando se comparan niveles de permeabilidad cercanos.

5 Estas curvas que representan la razón entre la permeabilidad local $\mu_{loc}(H_{cc})$ para un campo continuo superpuesto H_{cc} , y la permeabilidad local $\mu_{loc}(0)$ para un campo continuo superpuesto nulo, en función del campo continuo superpuesto H_{cc} , para diferentes materiales caracterizados por su permeabilidad lineal μ_{lin} , muestran que:

- 10 - para un núcleo según la invención que presenta una permeabilidad relativa lineal de 1700 (SAN μ_{1700}), la razón $\mu_{loc}(H_{cc}) / \mu_{loc}(0)$ sigue siendo casi igual a 1 para un campo H_{cc} que va hasta 2 Oe aproximadamente,
- para las aleaciones nanocristalinas a base de cobalto Hitperm μ_{700} y μ_{3500} , la razón $\mu_{loc}(H_{cc}) / \mu_{loc}(0)$ se vuelve inferior a 0,9 en cuanto el campo H_{cc} alcanza 0,1 Oe,
- 15 - para los polvos de FeNi compactados, la razón $\mu_{loc}(H_{cc})/\mu_{loc}(0)$ sigue siendo estable únicamente para las muestras correspondientes a permeabilidades reducidas (MPP μ_{300} y MPP μ_{30}), y para una permeabilidad relativa de 550 (MPP μ_{550}), la razón $\mu_{loc}(H_{cc}) / \mu_{loc}(0)$ se degrada muy rápido.

20 Este comportamiento muy favorable se debe asociar directamente a la muy buena linealidad del ciclo de histéresis B-H mientras no se alcance el punto de inflexión de saturación y tal como se observa en la figura 1 que representa un ciclo de histéresis. La remanencia B_r , es muy débil, y se obtiene $\mu_{loc} = \mu_{lin}$ y por tanto μ_{loc} es independiente de H_{cc} lo que es ideal para la aplicación.

25 En la figura 7 se observa que la variación relativa de permeabilidad μ_{lin} entre 20°C y 100°C no supera 10.

Para evaluar la reproducibilidad del procedimiento de fabricación, se han realizado tres núcleos nanocristalinos según la invención con la misma banda amorfa de partida y la misma tracción de 50 Mpa por enrollamiento. Tal como se muestra en la figura 8, las desviaciones de características entre los tres núcleos siguen siendo inferiores al 5%.

35 La permeabilidad magnética del núcleo de la invención varía en total en menos del 15% cuando la temperatura varía entre -25°C y +60°C, que es el intervalo máximo de temperatura de funcionamiento para la mayoría de las aplicaciones para medir la energía. A modo de comparación, uno amorfo a base de cobalto clásico varía en el 16%.

Caso de núcleos enrollados con $\mu_{lin} \approx 1700$	Núcleo de la invención	Núcleo amorfo a base de cobalto
$[\mu_{lin}(T)-\mu_{lin}(20^\circ\text{C})] / \mu_{lin}(20^\circ\text{C})$ en % entre -25°C y +60°C	-7%/+6%	-15%/+1%
$[\mu_{lin}(T)-\mu_{lin}(20^\circ\text{C})] / \mu_{lin}(20^\circ\text{C})$ en % entre -40°C y +120°C	-8%/+17%	-15%/+1%

Determinadas aplicaciones requieren funcionar hasta 120°C: en este caso el rendimiento se vuelve más favorable con el amorfo a base de cobalto.

40 En cambio, los núcleos de la invención presentan la gran ventaja con respecto a los amorfos a base de cobalto de que la permeabilidad evoluciona de manera monótona y casi lineal con la temperatura lo que permite proceder a una corrección electrónica fácil de la medición en función de la temperatura, mientras que esto parece mucho más difícil para el amorfo a base de cobalto. En particular esto se puede constatar en la figura 9.

45 Además, los inventores han constatado que la variación casi lineal de la permeabilidad con la temperatura se pudo observar hasta -100°C. En particular, mediciones de desviación entre la permeabilidad a la temperatura T y a 0°C han proporcionado los siguientes resultados:

T°C	0	-20	-40	-60	-80	-100
$\Delta\mu/\mu$ en %	0	-0,8	-2,1	-3,6	-5,4	-7,3

50 Además, el núcleo según la invención envejece muy poco por el efecto de la temperatura. Por tanto se ha podido medir menos del 1% de disminución de la permeabilidad lineal medida a 20°C, tras un tratamiento en estufa de 100h a 120°C. En comparación, uno amorfo a base de cobalto en las mismas condiciones ve como disminuye su permeabilidad en del 5 al 6%.

55 En la siguiente tabla se observa que se pueden garantizar unas linealidades mejores en el 5 o el 2% en los núcleos de la invención en intervalos de inducción del orden de 1 T. Se observa también que con una linealidad idéntica, el núcleo de la invención propone un intervalo de inducción de funcionamiento de aproximadamente el 10% más elevado que uno amorfo a base de cobalto.

Caso de núcleos enrollados con $\mu_{in} \approx 1700$	Núcleo de la invención	Núcleo amorfo a base de cobalto
ΔB accesible para $\Delta\mu_{loc}/\mu_{loc} < 2\%$	$\Delta B_{max} = 1,06$ T	$\Delta B_{max} = 0,94$ T
ΔB accesible para $\Delta\mu_{loc}/\mu_{loc} < 5\%$	$\Delta B_{max} = 1,12$ T	$\Delta B_{max} = 1,03$ T

5 Por último se observa que la frecuencia de corte del material de la invención (correspondiente a la frecuencia a la que se obtiene el máximo de amplitud de la permeabilidad imaginaria μ'' medida en un medidor de impedancia) es superior a 2 MHz, es decir aproximadamente 2 veces la frecuencia de corte de una aleación nanocristalina a base de cobalto (Hit.perm) cuyas permeabilidades de 590 y 2860 enmarcan a la del material de la invención tal como se muestra en la siguiente tabla. La estabilidad dinámica de los núcleos de la invención es por tanto muy buena y, debido a ello, se presta bien a su utilización en sensores de corriente de doble fase de tipo sonda de corriente.

Material	μ' (10 kHz)	Frecuencia f_c f_c (Max μ'')
Hitperm	590 2860	1 MHz 1 MHz
invención	1560	2 MHz

10 Además, la frecuencia de corte intrínseca puede alcanzar 10 MHz y más para las permeabilidades bajas.

15 La inducción de saturación B_s del núcleo puede ser superior a 0,9 teslas e incluso a 1 tesla, es decir 1, 2 teslas. En comparación, uno amorfo a base de cobalto no alcanzará 1 T de saturación.

Por otro lado, los inventores han estudiado la influencia del níquel y del cobalto, que es un elemento cuyos efectos son comparables a los del níquel, sobre las propiedades de las aleaciones a las que se refiere la presente invención.

20 La siguiente tabla proporciona, para una aleación cuya composición en % atómico es $(Fe_{100-x-y}Co_xNi_y)_{74}Cu_1Nb_3Si_{15}B_7$, el intervalo de permeabilidad accesible mediante el tratamiento térmico según la invención, el campo coercitivo H_c , el coeficiente de magnetostricción λ_s , la razón de las permeabilidades a 150°C y a 25°C y las pérdidas magnéticas a 500 kHz, para una inducción de 50 mT a 27°C.

x	y	Intervalo de μ accesible	H_c (A/m)	λ_s (en ppm)	$\mu(150^\circ C)/\mu(25^\circ C)$	Pérdidas magnéticas a 500 kHz, 50 mT, 27°C (en mW/cm ³)
0	0	de 4000 a 200, incluso menos	3	$-0,5 < \lambda_s < +0,5$	1,2	230
1,7	0	$\mu > 300$	4	0,8	1,4	480
4,9	0	$\mu > 600$	6	1,3	1,5	1225
2	1	$\mu > 350$	4,5	1	1,45	610
2,2	3	$\mu > 400$	4,8	1,5	1,6	780

25 En esta tabla se puede constatar, en particular, que cuanto más baja sea la suma de los contenidos en níquel y en cobalto, menor será el coeficiente de magnetostricción en valor absoluto.

30 Más generalmente, los inventores han constatado que cuando la suma de los contenidos en níquel y cobalto se mantiene inferior al 5%, y mejor al 4%, el coeficiente de magnetostricción se mantendrá, en valor absoluto, inferior a 2 ppm, y podría ser incluso inferior a 1 ppm.

35 Esta propiedad es particularmente interesante dado que la sensibilidad de la aleación a los esfuerzos externos (adhesión, revestimiento, impregnación, recorte, manipulación, etc.) es tanto más reducida cuanto menor sea el coeficiente de magnetostricción.

La aleación utilizada para la presente invención no contiene, en principio, cobalto, esencialmente por motivos de ahorro económico. No obstante, debido a las condiciones de elaboración, la aleación puede contener un poco de cobalto, a nivel de trazas, es decir, en contenidos inferiores al 0,5%.

40 En estas condiciones, con el fin de obtener núcleos muy poco sensibles a los esfuerzos generados durante la fabricación, es preferible que el contenido en níquel se mantenga inferior al 4,5%, mejor, inferior al 4% y aún mejor, inferior al 3%.

45 En el caso de una sonda de corriente, el núcleo de la invención, gracias a su alta saturación y su permeabilidad optimizada sin entrehierro, gracias a su frecuencia de corte que supera 1 MHz permite reducir el tamaño de la sonda en del 80 al 98%, lo que es una gran ventaja en los sistemas de control de los componentes de potencia.

Ejemplo - Miniaturización de un transformador de dos fases

Se construyó un transformador de corriente de dos fases según la invención sobre la base de las siguientes especificaciones:

- Frecuencia de corte baja: 100 Hz -3 dB
- Frecuencia de corte alta: 10 MHz -3dB
- Intervalo de frecuencia de medición: armónicos entre 100 Hz y 10 MHz
- Intervalo de medición: 50 CC + 50 CA: corriente de carga alterna 50 A + corriente continua 50 A superpuesta

Se construyó un transformador según la técnica anterior sobre la base de las mismas especificaciones, utilizando una primera fase convencional de ferrita con entrehierro localizado, mientras que el transformador según la invención se construyó utilizando una primera fase con materiales nanocristalinos de baja permeabilidad.

Las características magnéticas y dimensionales de los transformadores obtenidos se recogen en la siguiente tabla, en la que:

- Ae: sección del núcleo,
- Le: perímetro medio,
- Volumen: suma de los volúmenes de los 2 núcleos magnéticos,

$$Al = *Ae/Le$$

	Configuración según la invención		Configuración según la técnica anterior	
	Núcleo 1 1ª fase	Núcleo 2 2ª fase	Núcleo 3 1ª fase	Núcleo 4 2ª fase
A _e (m ²)	0,40	0,24	3,15	0,22
L _e (cm)	4,5	2,4	16	6,3
Volumen (cm ³)	2,376		51,786	

B _s (teslas)	1,25	1,25	0,3	1,25
A _L	183 nH	50 μH	318 nH	72 μH
Material	Nanocristalino según la invención (μ=200)	Nanocristalino convencional (T45-6 de Imphy)	Núcleo de ferrita de MnZn con entrehierro localizado	Nanocristalino convencional (T45-6 de Imphy)
Número de espiras	22	22	15	33
Resistencia del hilo	68 mΩ	5 Ω	46 mΩ	5Ω

Por tanto se observa que la utilización de compuestos nanocristalinos según la invención permite reducir el volumen del transformador de dos fases en un factor de 25, comparado con los transformadores de la técnica anterior que incorporan un núcleo de ferrita con entrehierro localizado. Además, un transformador de este tipo no requiere utilizar un blindaje.

La invención no se limita al modo de realización que se ha descrito.

Es por ello que es posible prever la realización de núcleos nanocristalinos de numerosas aleaciones tales como las que se han definido anteriormente que contienen hierro, silicio, un elemento amorfizante y otros elementos de adición, es posible regular las condiciones de temperatura y de sometimiento a esfuerzos durante el recocido a valores diferentes de los que se han indicado, encontrándose estos valores no obstante en los intervalos reivindicados.

Los núcleos realizados pueden ser circulares, cuadrados u oblongos.

Los núcleos realizados, tras haberse nanocristalizado con el fin de obtener una magnetostricción aparente de saturación próxima a cero, se pueden revestir con una resina protectora directamente sobre el metal en lugar de la caja protectora, sin riesgo de perturbación de los rendimientos magnéticos necesarios para un sensor de corriente tal como ya se ha descrito.

Los inventores han constatado de manera novedosa que tales núcleos se podían utilizar de manera muy ventajosa para fabricar núcleos de transformador para sensores de corriente alterna y más particularmente para sensores que presentan las configuraciones y aplicaciones específicas siguientes:

- núcleo de contador de energía de una sola fase que respete las especificaciones de la norma IEC 1036 para

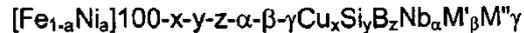
- 5 los calibres de corriente más pequeños en medición de energía a baja frecuencia (max 50 A), que pueda soportar en particular fuertes componentes continuas superpuestas y/o fuertes componentes armónicas superpuestas, que no presente ni entrehierro localizado, ni blindaje, que no presente cobalto, que sea tan preciso como uno amorfo a base de cobalto, eventualmente un poco menos estable en temperatura por encima de 60°C que uno amorfo a base de cobalto pero mucho más fácil de corregir, que envejezca mucho menos por encima de 100°C que uno amorfo a base de cobalto y que se preste para sensores por lo menos tan compactos.
- 10 - núcleo de transformador de corriente de un contador de energía con estructura de doble fase (calibres de corriente de carga superiores a 50 A a los que se superponen eventuales componentes continuas y/o armónicas) que requieran un intervalo de permeabilidad aún más reducido que anteriormente, a saber $\mu < 1200$, imposible de obtener actualmente sin entrehierro localizado (fuera del alcance de los amorfos a base de cobalto) y obtenido actualmente con núcleos cortados de hierro, FeSi o ferrita lo que introduce al mismo tiempo una fuerte histéresis, una fuerte sensibilidad a las perturbaciones electromagnéticas exteriores, lo que
- 15 puede obligar a un blindaje voluminoso y caro.
- 20 - núcleo de contador de energía realizado de manera innovadora con estructura de una sola fase gracias a una baja permeabilidad (normalmente < 1200) y una linealidad B-H muy fuerte antes de la saturación ($\Delta\mu/\mu < 1\%$ con respecto a $\Delta B = 1$ T) del núcleo de la invención, y sustituyendo así a la estructura de doble fase de los contadores de energía para calibres de corriente de carga superiores a 50 A a los que se superponen eventuales componentes continuas y/o armónicas. Cabe destacar que esta innovación no se limita a sustituir ventajosamente el transformador de corriente: sustituye al mismo tiempo el transformador de aislamiento y el núcleo de medición de alta permeabilidad (gracias a un núcleo de permeabilidad muy baja: se pasa así de una estructura doble a una de una sola fase)
- 25 - las sondas de corriente con gran dinámica de medición, para el control de corriente de los componentes activos de potencia (IGBT, GTO, tiristor...) en los dispositivos de potencia media y alta. Para tales equipos se utilizan estructuras de doble fase con un transformador de corriente en la parte delantera con baja permeabilidad equivalente y un sensor de corriente en derivación basado en un núcleo magnético de alta permeabilidad y gran estabilidad en frecuencia tal como un núcleo nanocristalino convencional ($\mu > 20000$).
- 30

Con estos núcleos es posible fabricar los sensores correspondientes que, con respecto a los sensores conocidos, presentan las ventajas que resultan directamente de las ventajas de los núcleos.

REIVINDICACIONES

1. Núcleo enrollado nanocristalizado sin entrehierro localizado, constituido por un material nanocristalino de composición atómica:

5



siendo $a \leq 0,3$, $0,6 \leq x \leq 1,5$, $10 \leq y \leq 17$, $5 \leq z \leq 14$, $2 \leq \alpha \leq 6$, $\beta \leq 7$, $\gamma \leq 8$, siendo M' por lo menos uno de los elementos V, Cr, Al y Zn, siendo M'' por lo menos uno de los elementos C, Ge, P, Ga, Sb, In y Be, presentando una inducción remanente inferior a 0,02 T y una frecuencia de corte superior a 1 MHz,

10

estando dicho núcleo caracterizado por que presenta una permeabilidad μ superior a 1000 e inferior o igual a 4000, una saturación de más de 1 T, un intervalo de inducción en el que la permeabilidad no varía en más del 5% superior a 0,9 T, por que es tal que μ medida a 20°C varía en menos del 1% cuando el núcleo es sometido a un envejecimiento de 100 h a 120°C, el coeficiente de magnetostricción de dicho núcleo es, en valor absoluto, inferior a 2 ppm, μ varía en menos del 15% cuando la temperatura varía entre -25°C y +60°C, y en menos del 25% cuando la temperatura varía entre -40°C y +120°C, por que μ varía de manera monótona y casi lineal con la temperatura entre -40°C y +120°C, y por que el contenido en níquel es inferior al 4,5%.

15

2. Núcleo enrollado según la reivindicación 1, caracterizado por que μ varía de manera monótona y casi lineal con la temperatura entre -100°C y +120°C.

20

3. Núcleo enrollado según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que la composición de la aleación nanocristalina es tal que, en % atómico:

25

$$\begin{aligned} 0,8\% &\leq \text{Cu} \leq 1,2\% \\ 2,5\% &\leq \text{Nb} \leq 3,5\% \\ 12\% &\leq \text{Si} \leq 16,5\% \\ 6\% &\leq \text{B} \leq 9\% \end{aligned}$$

30

siendo el resto hierro e impurezas.

4. Dispositivo de medición eléctrica de tipo contador de energía o de tipo sonda de corriente que comprende por lo menos un núcleo magnético, caracterizado por que por lo menos un núcleo magnético es un núcleo nanocristalino sin entrehierro localizado, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3.

35

5. Dispositivo según la reivindicación 4, caracterizado por que constituye un contador de energía de una sola fase de acuerdo con la norma IEC 1036 para los calibres inferiores a 50 A, cuyo núcleo magnético nanocristalino presenta una permeabilidad μ comprendida entre 1000 y 4000, y preferentemente inferior a 3000.

40

6. Dispositivo según la reivindicación 5, caracterizado por que no comprende ningún blindaje.

7. Dispositivo según la reivindicación 5 o 6, caracterizado por que es adecuado para medir una corriente que comprende una fuerte componente continua.

FIG. 1

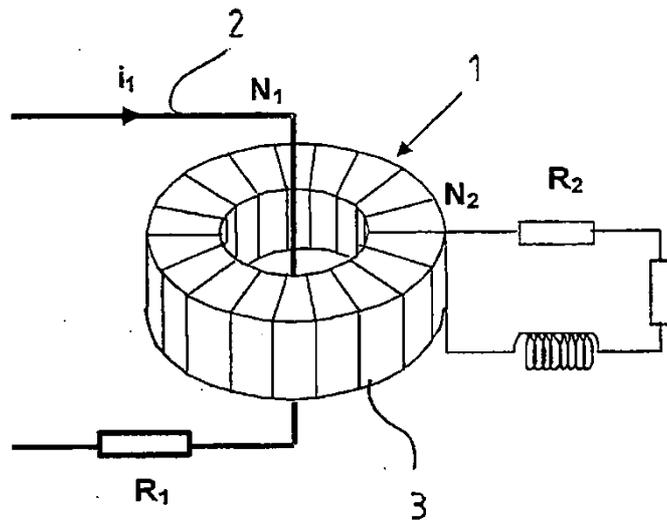


FIG. 2

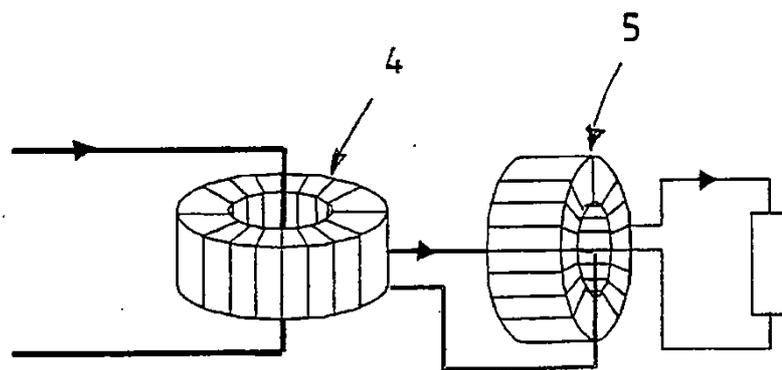


FIG. 3

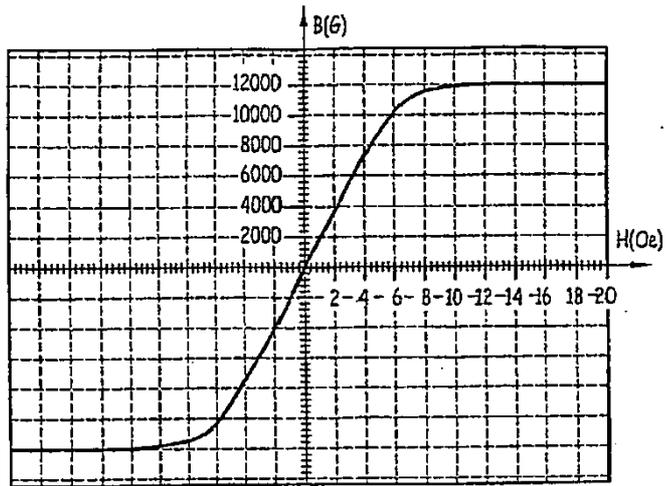


FIG. 4

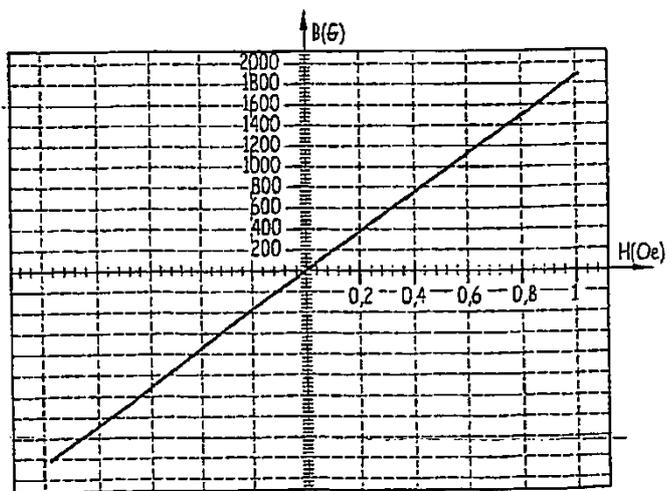


FIG. 5

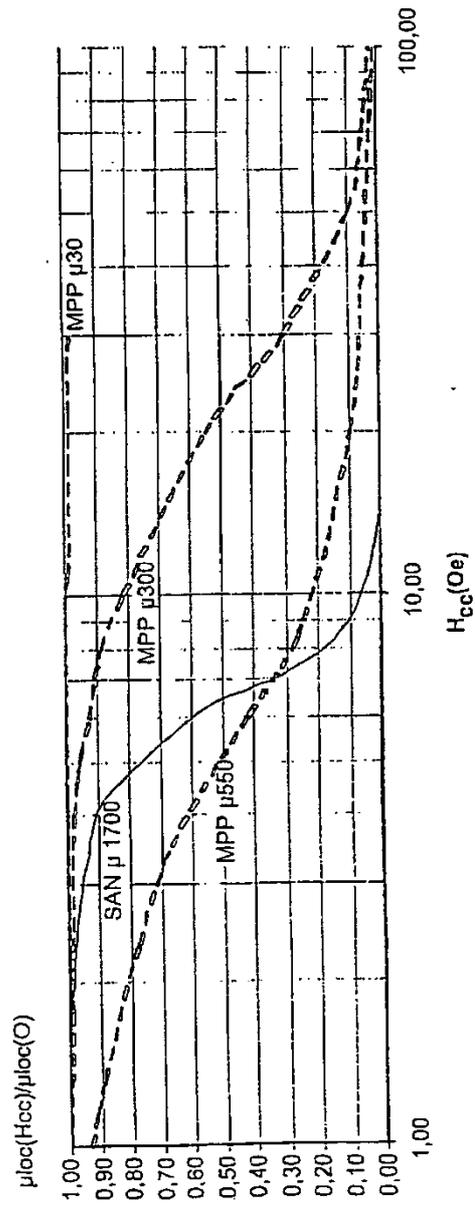


FIG. 6

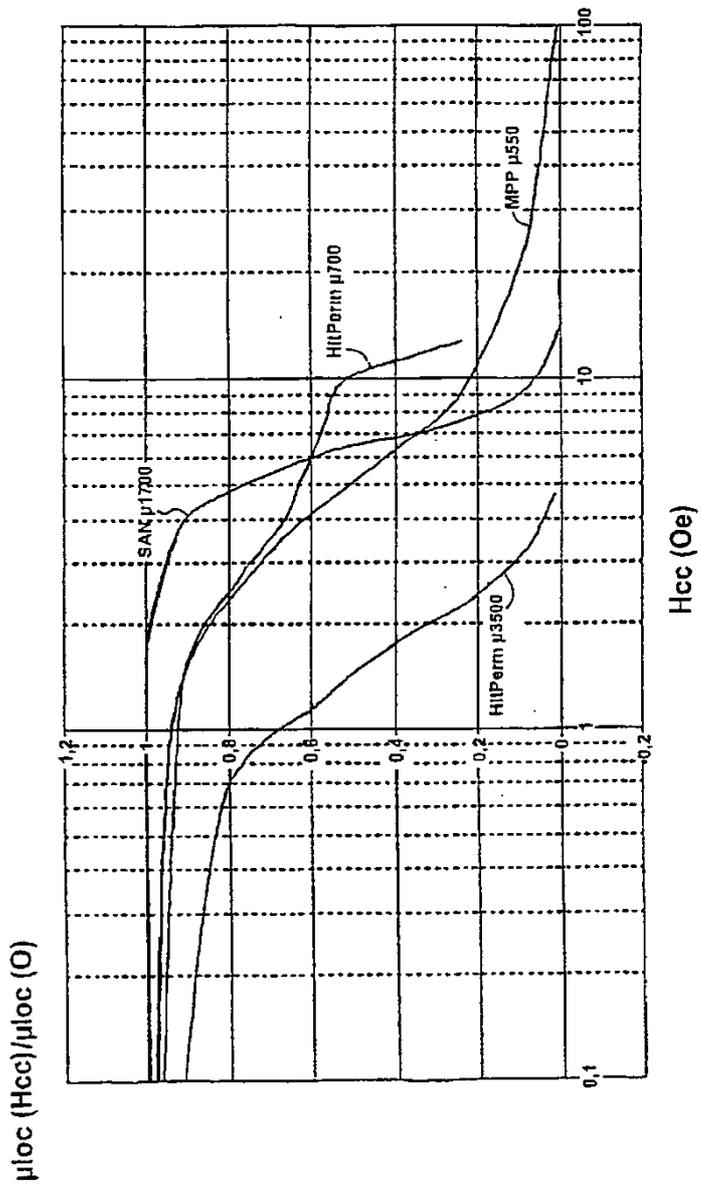


FIG. 7

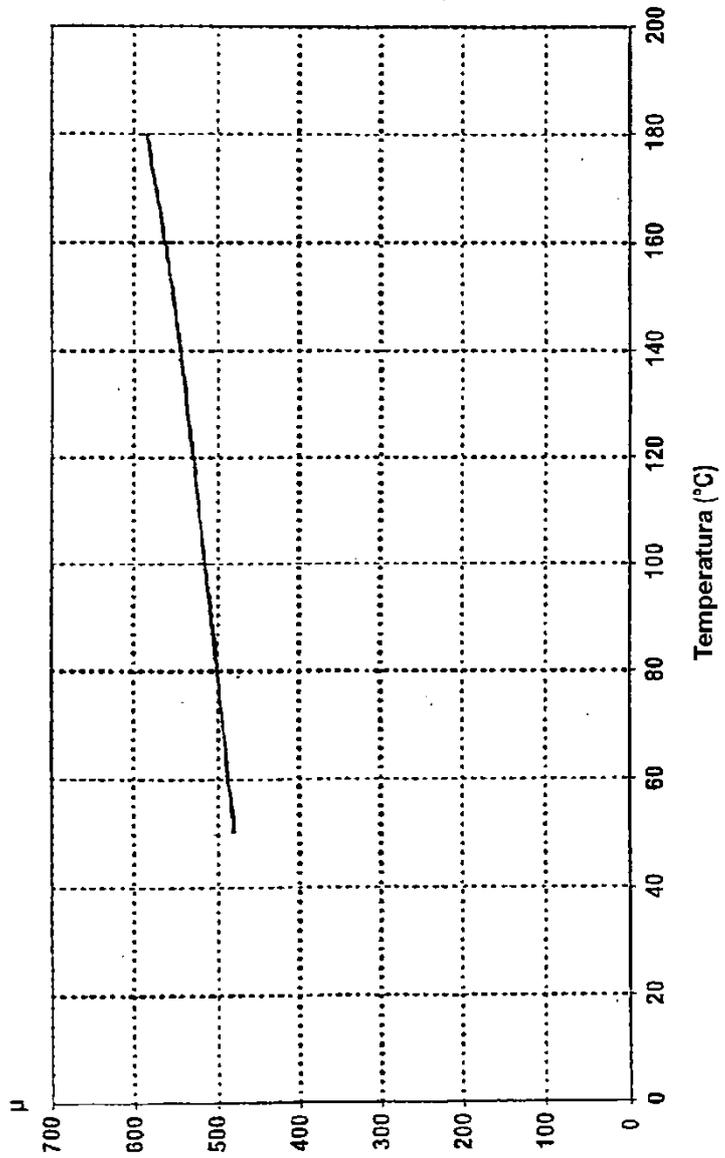


FIG. 8

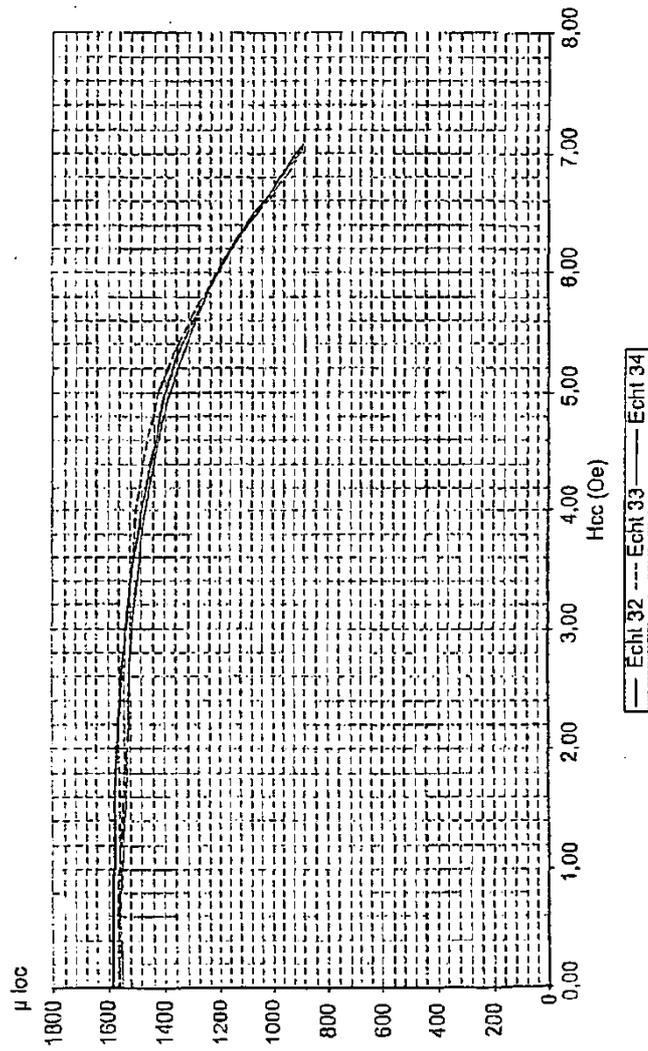


FIG. 9

