

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 771 050**

51 Int. Cl.:

H01F 1/153 (2006.01)

G01R 22/00 (2006.01)

H01F 27/42 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.10.2005** **E 10184081 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2020** **EP 2293308**

54 Título: **Dispositivo de medición eléctrica que comprende un núcleo magnético de un material nanocristalino**

30 Prioridad:

29.10.2004 FR 0411618

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

06.07.2020

73 Titular/es:

APERAM ALLOYS IMPHY (33.3%)
Avenue Jean Jaurès
58160 Imphy, FR;
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (33.3%) y
ECOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN
(33.3%)

72 Inventor/es:

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

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 771 050 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

Dispositivo de medición eléctrica que comprende un núcleo magnético de un material nanocrystalino

5 **[0001]** La invención se refiere a un dispositivo de medición eléctrica del tipo de sensor de energía o sonda de corriente.

[0002] En el caso de componentes para sensor de corriente y en particular para sensor de corriente alterna, que constan eventualmente de una componente continua superpuesta significativa, es necesario disponer de núcleos
10 que tengan unas permeabilidades reducidas a fin de 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 ciertos casos, en una banda de frecuencia amplia.

15 **[0003]** Tales sensores de corriente encuentran en concreto uso 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.

[0004] Un transformador de corriente con conexión directa a la corriente de carga (de tipo 1 según la norma IEC 1036; 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) consta de una sola etapa, 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. Como se puede observar en la figura 1, tal transformador designado en general por 1 en la figura 1, está constituido generalmente por tres partes:

25
- un circuito magnético tórico (no visible directamente en la figura) para minimizar las fugas magnéticas,
- 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
30 corriente i_2 .

[0005] 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 , no es necesario que el conjunto de estas corrientes lleve 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 no se debe superar so pena de saturación es entonces $\Delta B/\mu_{\max}$ y la
40 condición de no saturación al respecto es la siguiente:

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

[0006] 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.

45 **[0007]** 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 etapa y un núcleo magnético de aleación amorfa a base de cobalto.

[0008] 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 etapa tal como la representada en la figura 2, con transformador de corriente en la parte delantera designado generalmente 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 generalmente por 5, en derivación del transformador. Como este último evita cualquier riesgo de saturación en el sensor, es muy conveniente utilizar un núcleo magnético con una permeabilidad muy alta.

55 **[0009]** 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 al menos 1 MHz. El sensor con mejor rendimiento es el que tiene la máxima precisión y
60 dinámica de medición para un volumen general lo más pequeño.

[0010] Para tales equipos, se utilizan estructuras de doble etapa similares a la que se acaba de describir, con

un transformador de corriente en la parte delantera con permeabilidad equivalente pequeña y un sensor de corriente en derivación basado en un núcleo magnético de alta permeabilidad y gran estabilidad de frecuencia tal como un núcleo nanocristalino convencional de alta permeabilidad ($\mu > 20000$).

5 **[0011]** 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 como:

- 10 - El núcleo del componente inductivo debe presentar una buena estabilidad térmica de sus propiedades magnéticas, lo que permite en particular sobrepasar la temperatura límite de funcionamiento del componente y tener una precisión de medición poco dependiente de la temperatura de funcionamiento. Esta estabilidad de temperatura es normalmente del orden de algunos % de variación de permeabilidad entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 15 - Debe presentar además un envejecimiento bajo en atmósferas que pueden superar los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 15 - 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 el uso 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. Según la invención, la permeabilidad está comprendida entre 200 y 1000.
- 20 - La solución magnética utilizada no debe constar de entrehierro localizado, de manera que limite la sensibilidad a las radiaciones electromagnéticas parásitas. Esto permite también evitar tener que utilizar un blindaje.
- 25 - También es necesario buscar una inducción de saturación B_s que sea elevada, a 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.
- 30 - Para los transformadores de corriente destinados a trabajar bajo componente continua superpuesta, es deseable tener una "fuerte linealidad B-H", es decir una relación entre B y H tan lineal como sea posible en un intervalo importante de inducción DB: se pretende una variación máxima de μ en este intervalo de como mucho algunos %. De hecho, cuanto más elevado sea DB, con un intervalo de corriente de polarización $I_{cc}^{m\acute{a}x}$ 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.
- 35 - Es deseable tener 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).
- 40 - El núcleo también debe presentar pequeñas pérdidas magnéticas para limitar el desfase entre corriente y tensión del sensor y por tanto aumentar la precisión.
- 40 - También es deseable que las propiedades magnéticas de los componentes inductivos sean poco sensibles a las limitaciones externas, tales como las limitaciones de recubrimiento, de bobinado.
- 45 - Además, la dinámica de frecuencia de imantación debe ser buena, es decir, que la frecuencia de "corte intrínseco alto" es elevada, y más particularmente al menos igual a 1 MHz sin blindaje del sensor. En el contexto de la presente invención, se denomina frecuencia de corte de un material conductor a la frecuencia para la que se obtiene el máximo de amplitud de " μ ", parte imaginaria compleja de la permeabilidad y que representa los efectos disipativos por corrientes inducidas.
- 45 - El núcleo debe ser lo más económico posible.

50 **[0012]** Para realizar transformadores de corriente, es común el uso de núcleos magnéticos tóricos de aleación de Fe y Ni con 80 % de níquel, pero estas aleaciones tienen una permeabilidad relativa que varía sustancialmente con el campo de polarización, permaneciendo en todo momento muy superior a 10000. Por tanto son inadecuados para los transformadores de corriente que trabajan bajo fuerte componente continua.

55 **[0013]** Se ha propuesto, en concreto en el documento US 6.507.262 B1, utilizar una aleación nanocristalina a base de hierro del tipo Fe-Co-Cu-Si-B que puede no contener cobalto, con una permeabilidad elevada, comprendida entre 12000 y 300000. Del mismo modo, se ha propuesto utilizar una aleación amorfa a base de cobalto que tiene una permeabilidad comparable. Estas dos soluciones que tienen la ventaja de presentar relaciones B-H muy lineales, presentan el inconveniente de tener permeabilidades muy elevadas que conducen a la saturación de núcleos magnéticos una vez que la componente continua de la corriente a medir alcanza algunos amperios.

60 **[0014]** También se ha propuesto utilizar núcleos magnéticos de aleación amorfa a base de cobalto con una permeabilidad relativa de algunos millares ajustada por recocido bajo campo transversal. Estas aleaciones que tienen la ventaja de tener una permeabilidad no demasiado elevada, presentan, no obstante, el inconveniente de tener una inducción de saturación inferior a 0,8 Tesla, 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 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el cobalto es un elemento muy caro.

65

[0015] También se ha propuesto utilizar una aleación nanocristalina de Fe-Co-Nb-Si-B-Cu que contiene 60 % (atómico) de Co que permite ajustar la permeabilidad hasta valores de algunas centenas o algunos millares mientras se conservan ciertas ventajas de las aleaciones nanocristalinas de Fe-Cu-Nb-Si-B, a saber, la estabilidad de temperatura de los rendimientos, la baja remanencia y el bajo campo coercitivo. Estas aleaciones presentan no obstante el inconveniente de tener una inducción de saturación baja y contener gran cantidad de cobalto que es muy caro.

[0016] 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.

[0017] En concreto, se conoce del documento WO 94/28429 A1 un dispositivo de medición de una corriente eléctrica que comprende un circuito magnético fabricado de material de ferrita Ni-Zn.

[0018] Parece que ninguna de las soluciones conocidas es verdaderamente satisfactoria.

[0019] 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 esté, en particular, sin entrehierro, con permeabilidad magnética relativa ajustable de manera precisa entre 200 y 4000, apto para satisfacer las necesidades de los sensores de corriente para medir la energía, tanto en conexión directa con estructura con una sola etapa, como en conexión al transformador de corriente con estructura con doble etapa, y apto para satisfacer asimismo las necesidades de las sondas de corriente para el control dinámico de corriente de los componentes activos de los sistemas electrónicos, y ello ocupando el menor volumen posible, sin necesidad de utilizar un blindaje y siendo lo más económico posible.

[0020] A tal efecto, la invención tiene como objeto un dispositivo de medición según la reivindicación 1.

[0021] La invención tiene igualmente como objeto un dispositivo de medición según la reivindicación 2.

[0022] En una realización preferida, el núcleo enrollado según la invención presenta una composición tal que, en % en átomos:

$$\text{Ni} \leq 4,5\%$$

$$0,8\% \leq \text{Cu} \leq 1,2 \%$$

$$2,5\% \leq \text{Nb} \leq 3,5\%$$

$$12 \% \leq \text{Si} \leq 16,5\%$$

$$6 \% \leq \text{B} \leq 9\%$$

siendo el resto hierro e impurezas.

[0023] El núcleo según la invención tiene la ventaja de ser muy económico ya que no contiene cobalto.

[0024] Además, su permeabilidad eficaz local es muy próxima a su permeabilidad lineal. De hecho, los inventores han constatado que esta permeabilidad eficaz local μ_{loc} es sobre todo próxima a la permeabilidad μ_{lin} correspondiente a la pendiente de un ciclo de histéresis principal porque la remanencia del ciclo de histéresis es baja. Así, se preferirán núcleos que presenten una remanencia B_r muy baja, normalmente inferior a 0,02 T.

[0025] A continuación se describe así un dispositivo de medición eléctrica del tipo contador de energía o del tipo de sonda de corriente que comprende al menos un núcleo magnético, siendo al menos un núcleo magnético un núcleo nanocristalino sin entrehierro según la invención.

[0026] En una realización preferida, el contador de energía de una sola etapa no consta de blindaje.

[0027] El dispositivo de medición eléctrica puede ser un contador de energía con doble etapa 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 inferior a 800.

[0028] El dispositivo de medición eléctrica también puede ser un contador de energía según la norma IEC 1036 para los calibres superiores a 50 A, con una sola etapa y que comprende un núcleo según la invención cuya permeabilidad μ está comprendida entre 200 y 1000, y preferentemente inferior a 800.

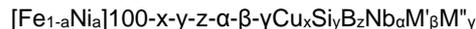
10

[0029] Preferentemente, un contador de energía según la invención es apto para medir una corriente que consta de una fuerte componente continua.

[0030] El dispositivo de medición eléctrica puede, por último, 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 inferior a 800.

[0031] El núcleo magnético según la invención se adapta especialmente bien para su uso 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.

[0032] 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:

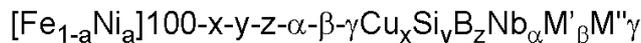


con $a \leq 0,3$, $0,6 \leq x \leq 1,5$, $10 \leq y \leq 17$, $5 \leq z \leq 14$, $2 \leq \alpha \leq 6$, $\beta \leq 7$, $\gamma \leq 8$, siendo M' al menos uno de los elementos V, Cr, Al y Zn, siendo M'' al menos uno de los elementos (C, Ge, P, Ga, Sb, In, Be). Para obtener la estructura nanocristalina,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

[0033] Se podrá hacer referencia a la solicitud FR 2 823 507 para mayor información acerca del procedimiento de recocido bajo tracción.

40

[0034] De manera general, las aleaciones utilizadas para la fabricación de bandas amorfas de hierro-silicio tienen la siguiente composición atómica:



45

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' al menos uno de los elementos V, Cr, Al y Zn,
siendo M'' al menos uno de los elementos C, Ge, P, Ga, Sb, In, Be.

[0035] Estas aleaciones pueden tener en particular la siguiente composición ponderal:
 $\text{Fe}_{72} \text{q}_{77} \text{Cu}_1 \text{Nb}_3 \text{Si}_{12.5} \text{q}_{17} \text{B}_6 \text{q}_{12}$, estando el resto de la aleación constituido esencialmente por impurezas inevitables.

[0036] El material se elabora en forma líquida y después se cuele con una gran velocidad de enfriamiento, en una instalación de colada de cintas amorfas de cilindro enfriado de tipo convencional, de modo que se obtiene en la salida de la instalación de colada una banda amorfa enrollada en forma de bobina con espiras unidas.

[0037] 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.

[0038] Además, la banda obtenida y enrollada a la salida del recocido instantáneo se puede desenrollar y después volverse a enrollar, lo que permite realizar núcleos magnéticos cuyas espiras se aíslan entre sí, como se explicará más adelante. En cualquier caso, se realiza un tratamiento de recocido en desplazamiento o recocido

instantáneo bajo tensión con un valor preciso de la fuerza de tracción, a una temperatura bien definida y a una velocidad de desplazamiento ajustada.

[0039] De manera más general, en función de las características de la banda y de la temperatura del horno 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.

[0040] Es posible determinar una curva de calibración del valor de tracción para obtener un nivel de permeabilidad definido en la cinta entre 200 y 4000.

[0041] Sin embargo, para obtener un núcleo en el que se limita la circulación de las corrientes inducidas y las pérdidas magnéticas, es necesario evitar la formación de contactos eléctricos entre las espiras, durante el devanado del núcleo recocido. Con el fin de 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 entre sí. Por ejemplo, se puede depositar de manera continua, sobre la banda tras el recocido, una sustancia mineral en un espesor de una décima de micrómetro a algunos micrómetros.

[0042] Para esto, es posible desenrollar la banda de la bobina obtenida a la salida de la instalación de recocido y volverla a enrollar bajo tensión mecánica baja, depositando eventualmente sobre la banda desenrollada, un material de aislamiento eléctrico antes del reenrollado, para aislar entre sí las espiras sucesivas del núcleo.

[0043] Generalmente, las condiciones de cristalización de la banda en el interior del horno de recocido dinámico bajo tensión son tales que la banda consta de al menos 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 permanece amorfa.

[0044] El núcleo magnético según la invención presenta la ventaja de tener un bajo coeficiente de magnetostricción. Por lo tanto, sus propiedades magnéticas no se modifican, cuando se realizan operaciones de recubrimiento, impregnación, bobinado, encolado... que se traducen en tensiones ejercidas sobre el núcleo. Así, por ejemplo, cuando se recubre un núcleo de la invención, su permeabilidad lineal varía en menos de 5 %, en particular cuando se mide a 20 °C.

[0045] El núcleo magnético puede ser redondo, ovalado o cuadrado sin entrehierro.

La figura 1 es un diagrama de bloques de un contador de energía con una sola etapa.
 La figura 2 es un diagrama de bloques de un contador de energía con doble etapa.
 La figura 3 y la figura 4 son diagramas que dan respectivamente los ciclos de histéresis de saturación ($H_{\text{máx}} = 20$ Oe) y lineal ($H_{\text{máx}} = 1$ Oe) de un núcleo.
 Las figuras 5 y 6 son curvas que representan la relación de la permeabilidad magnética para una corriente (o campo H) que tiene una componente continua (o campo H_{cc} correspondiente en el caso de la figura 6 o 7) no nula a la permeabilidad magnética para una corriente (o campo H) que tiene una componente continua nula, para diferentes materiales.
 La figura 7 es una curva que da la permeabilidad de un núcleo según la invención 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.
 La figura 9 representa la estabilidad de μ en función de la temperatura para un núcleo de recocido instantáneo según la invención y para uno amorfo a base de cobalto.

[0046] A modo de ejemplo, se ha realizado la cristalización en nanocristales en la matriz amorfa de una banda amorfa de composición $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_7$, por 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 a 655 °C durante 35 segundos. La banda amorfa fue preaislada por el paso por un baño de metilato de magnesio. Después del reenrollado en un núcleo de diámetro interior de 20 mm, una caracterización por un procedimiento 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: de este modo, 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 solo trabaja en ciclo de histéresis extremadamente lineal y delgado (figura 4), lo que corresponde al ideal de un sensor de corriente.

[0047] La remanencia es tan baja que resulta difícil dar un valor diferente de 0 con imprecisión de medición cercana. En cualquier caso es cierto que es inferior a 0,02 T. El campo coercitivo de 21 mOe también es muy bajo 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 por las curvas representadas en las figuras 5 y 6 en las que se ve, por 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 vecinos.

[0048] Estas curvas que representan la relación 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:

- 5 - para un núcleo que tiene una permeabilidad relativa lineal de 1700 (SAN $\mu 1700$), la relación $\mu_{loc}(H_{cc})/\mu_{loc}(0)$ 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 $\mu 700$ y $\mu 3500$, la relación $\mu_{loc}(H_{cc})/\mu_{loc}(0)$ llega a ser inferior a 0,9 en el momento en el que el campo H_{cc} alcanza 0,1 Oe,
- 10 - para los polvos de FeNi compactados, la relación $\mu_{loc}(H_{cc})/\mu_{loc}(0)$ sigue siendo estable únicamente para las muestras que corresponden a permeabilidades pequeñas (MPP $\mu 300$ y MPP $\mu 30$), y para una permeabilidad relativa de 550 (MPP $\mu 550$), la relación $\mu_{loc}(H_{cc})/\mu_{loc}(0)$ se degrada muy rápido.

[0049] Este comportamiento muy favorable está directamente relacionado con la muy buena linealidad del ciclo de histéresis B-H mientras no se alcance el codo de saturación y tal como se ve en la figura 1 que representa un ciclo de histéresis. La remanencia B_r , es muy baja, y se obtiene $\mu_{loc} = \mu_{lin}$ y, por tanto, μ_{loc} es independiente de H_{cc} , lo que es ideal para la aplicación.

[0050] En la figura 7 se ve que la variación relativa de permeabilidad μ_{lin} entre 20 °C y 100 °C no supera 10.

[0051] Para evaluar la reproducibilidad del procedimiento de fabricación, se han realizado tres núcleos nanocristalinos con la misma banda amorfa de partida y la misma tracción de 50 Mpa por enrollado. Como se muestra en la figura 8, las desviaciones de características entre los tres núcleos siguen siendo inferiores a 5 %.

[0052] La permeabilidad magnética del núcleo de la invención varía en total en menos de 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, un amorfo a base de cobalto convencional varía en un 16 %.

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

[0053] Ciertas aplicaciones necesitan funcionar hasta 120 °C: en este caso, los rendimientos llegan a ser más favorables con el amorfo a base de cobalto.

[0054] Por el contrario, los núcleos de la invención presentan la gran ventaja en cuanto 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 se puede constatar en la figura 9.

[0055] Además, los inventores han constatado que la variación más o menos lineal de la permeabilidad con la temperatura pudo observarse hasta -100 °C. En particular, las mediciones de desviación entre la permeabilidad a la temperatura T y a 0 °C han dado 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

[0056] Además, el núcleo según la invención envejece muy poco por el efecto de la temperatura. De este modo, se ha podido medir menos del 1 % de disminución de la permeabilidad lineal medida a 20 °C, después de un secado en estufa de 100 h a 120 °C. En comparación, un amorfo a base de cobalto en las mismas condiciones muestra la disminución de la permeabilidad de 5 a 6 %.

[0057] En la siguiente tabla se ve que se pueden garantizar mejores linealidades en 5 o 2 % en los núcleos de la invención en intervalos de inducción del orden de 1 T. También se ve que, con una linealidad idéntica, el núcleo propone un intervalo de inducción de funcionamiento de aproximadamente 10 % más elevado que un amorfo a base de cobalto.

Caso de núcleos enrollados con $\mu_{lin} \approx 1700$	Núcleo	Núcleo amorfo a base de cobalto
---	--------	---------------------------------

(continuación)

DB accesible para $D\mu_{loc}/\mu_{loc} < 2 \%$	DBmáx = 1,06 T	DBmáx = 0,94 T
DB accesible para $D\mu_{loc}/\mu_{loc} < 5 \%$	DBmáx = 1,12 T	DBmáx = 1,03 T

[0058] Cabe señalar, por último, 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 impedancímetro) es superior a 2 MHz, aproximadamente 2 veces la frecuencia de corte de una aleación nanocrystalina a base de cobalto (Hit perm) cuyas permeabilidades de 590 y 2860 enmarcan a la del material de la invención como se muestra en la siguiente tabla. La estabilidad dinámica de los núcleos de la invención es por tanto muy buena y, en consecuencia, se presta bien a su uso en sensores de corriente con doble etapa de tipo sonda de corriente.

Material	μ' (10 kHz)	Frecuencia f_{fc} (Máx μ'')
Hitperm	590	1 MHz
	2860	1 MHz
invención	1560	2 MHz

10 **[0059]** Además, la frecuencia de corte intrínseca puede alcanzar 10 MHz y más para las permeabilidades bajas.

[0060] La inducción de saturación B_s del núcleo puede ser superior a 0,9 Tesla e incluso a 1 Tesla, incluso a 1, 2 Teslas. En comparación, un amorfo a base de cobalto no alcanzará 1 T de saturación.

15 **[0061]** Además, los inventores han estudiado la influencia del níquel y del cobalto, que es un elemento cuyos efectos son comparables a los del níquel, en las propiedades de las aleaciones a las que se refiere la presente invención.

20 **[0062]** La siguiente tabla da, para una aleación cuya composición en % en átomos es $(Fe_{100-x-y}Co_xNi_y)_{74}Cu_1Nb_3Si_{15}B_7$, el intervalo de permeabilidad accesible por el tratamiento térmico según la invención, el campo coercitivo H_c , el coeficiente de magnetostricción λ_s , la relación de la permeabilidad a 150 °C y a 25 °C, y las pérdidas magnéticas a 500 kHz, para una inducción de 50 mT a 27 pc.

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	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 **[0063]** En esta tabla se puede constatar en concreto que cuanto más baja sea la suma de los contenidos de níquel y cobalto, menor será el coeficiente de magnetostricción en valor absoluto.

30 **[0064]** Más generalmente, los inventores han constatado que cuando la suma de los contenidos de níquel y cobalto se mantiene inferior a 5 %, y mejor a 4 %, el coeficiente de magnetostricción se mantendrá, en valor absoluto, inferior a 2 ppm, y podría ser incluso inferior a 1 ppm.

[0065] Esta propiedad es particularmente interesante puesto que la sensibilidad de la aleación a las tensiones externas (encolado, recubrimiento, impregnación, corte, manipulación, etc.) es tanto más baja cuanto más bajo sea el coeficiente de magnetostricción.

35 **[0066]** La aleación utilizada para la presente invención no contiene, en principio, cobalto, esencialmente por razones económicas. Sin embargo, debido a las condiciones de elaboración, la aleación puede contener un poco de cobalto, en trazas, es decir, en contenidos inferiores a 0,5 %.

40 **[0067]** En estas condiciones, con el fin de obtener núcleos muy poco sensibles a las tensiones generadas durante la fabricación, es preferible que el contenido de níquel sea inferior a 4,5 %, mejor, inferior a 4 % y aún mejor, inferior a 3 %.

[0068] 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 de 80 a 98 %, lo que supone una gran ventaja en los sistemas de control de los componentes de potencia.

5 Ejemplo - Miniaturización de un transformador con dos etapas

[0069] Se construyó un transformador de corriente con dos etapas según la invención en base a las siguientes especificaciones:

- 10
- 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

15 **[0070]** Se construyó un transformador según la técnica anterior en base a las mismas especificaciones, utilizando una primera etapa convencional de ferrita con entrehierro localizado, mientras que el transformador según la invención se construyó utilizando una primera etapa con materiales nanocristalinos de baja permeabilidad.

20 **[0071]** 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,

25 Volumen: suma de los volúmenes de los 2 núcleos magnéticos,

$$AI = *AeLe$$

	Configuración según la invención		Configuración según la técnica anterior	
	Núcleo 1 1ª etapa	Núcleo 2 2ª etapa	Núcleo 3 1ª etapa	Núcleo 4 2ª etapa
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 (Tesla)	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	5 Ω

30 **[0072]** Se ve por tanto que el uso de compuestos nanocristalinos según la invención permite reducir el volumen del transformador con dos etapas en un factor de 25, en comparación con los transformadores de la técnica anterior que incorporan un núcleo de ferrita con entrehierro localizado. Además, tal transformador no necesita utilizar un blindaje.

35 **[0073]** La invención no se limita a la realización que se ha descrito.

[0074] Así pues, se puede prever realizar núcleos nanocristalinos de numerosas aleaciones tales como las que se han definido anteriormente que contienen hierro, silicio, un elemento amorfizando y otros elementos de adición, se pueden ajustar las condiciones de temperatura y puesta en tensión durante el recocido con valores diferentes de los que se han indicado, estando estos valores, sin embargo, en los intervalos reivindicados.

[0075] Los núcleos realizados pueden ser circulares, cuadrados u oblongos.

[0076] Los núcleos realizados, después de haber sido nanocristalizados a fin de obtener una magnetostricción aparente de saturación próxima a cero, pueden recubrirse con una resina protectora directamente sobre el metal en
5 lugar de la caja protectora, sin riesgo de perturbación de los rendimientos magnéticos necesarios para un sensor de corriente como ya se ha descrito.

[0077] Los inventores han constatado de manera novedosa que tales núcleos podrían utilizarse de manera muy ventajosa para fabricar núcleos de transformador para sensores de corriente alterna y más particularmente para
10 sensores que tienen las siguientes configuraciones y aplicaciones específicas:

- núcleo de contador de energía con una sola etapa que respeta las especificaciones de la norma IEC 1036 para los calibres de corriente más pequeños para medir la energía a baja frecuencia (máx 50 A), que puede soportar en concreto fuertes componentes continuas superpuestas y/o fuertes componentes armónicas superpuestas, que no
15 presenta ni entrehierro localizado, ni blindaje, que no tiene cobalto, tan preciso como un amorfo a base de cobalto, eventualmente un poco menos estable en temperatura por encima de 60 °C que un amorfo a base de cobalto pero mucho más fácil de corregir, que envejece mucho menos por encima de 100 °C que un amorfo a base de cobalto y adecuado para sensores al menos tan compactos.

- núcleo de transformador de corriente de un contador de energía con estructura con doble etapa (calibres de corriente de carga superiores a 50 A a los que se superponen eventuales componentes continuas y/o armónicas)
20 que necesitan 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 tanto una fuerte histéresis como una fuerte sensibilidad a las perturbaciones electromagnéticas exteriores, lo que puede obligar a un blindaje voluminoso y costoso.

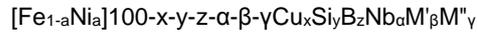
- núcleo de contador de energía realizado de manera innovadora con estructura con una sola etapa gracias a una baja permeabilidad (normalmente < 1200) y una linealidad B-H muy fuerte antes de la saturación ($D\mu/\mu < 1\%$ a DB = 1 T) del núcleo de la invención, y reemplazando así la estructura con doble etapa de los contadores de energía
30 para calibres de corriente de carga superiores a 50A a los que se superponen eventuales componentes continuas y/o armónicas. Tenga en cuenta que esta innovación no se limita a reemplazar ventajosamente el transformador de corriente: reemplaza tanto el transformador de aislamiento como el núcleo de medición de alta permeabilidad (gracias a un núcleo de permeabilidad muy baja: se pasa así de una estructura doble a una sola etapa).

- 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
35 estructuras de doble etapa con un transformador de corriente en la parte delantera con permeabilidad equivalente pequeña y un sensor de corriente en derivación basado en un núcleo magnético de alta permeabilidad y gran estabilidad de frecuencia tal como un núcleo nanocristalino convencional ($\mu > 20000$).

[0078] Con estos núcleos se pueden fabricar los sensores correspondientes que, con respecto a los sensores
40 conocidos, presentan las ventajas que resultan directamente de las ventajas de los núcleos.

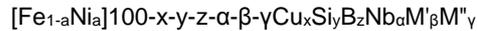
REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de medición eléctrica del tipo contador de energía con una sola etapa que comprende un núcleo magnético, **caracterizado porque** dicho núcleo magnético es un núcleo enrollado nanocristalizado sin entrehierro localizado constituido por un material nanocristalino de composición atómica:



10 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' al menos uno de los elementos V, Cr, Al y Zn, siendo M'' al menos uno de los elementos C, Ge, P, Ga, Sb, In, Be, cuyo contenido de níquel es inferior a 4,5 %, que tiene una permeabilidad μ comprendida entre 200 y 1000, una saturación de más de 1 T, un intervalo de inducción en el que la permeabilidad no varía en más de un 5 % superior a 0,9 T, una inducción remanente inferior a 0,02 T y una frecuencia de corte superior a 1 MHz, y tal que μ varía en menos de 15 % cuando la temperatura varía entre -25 °C y +60 °C, y en menos de 25 % cuando la temperatura varía entre -40 °C y +120 °C.

2. Dispositivo de medición eléctrica del tipo contador de energía o del tipo sonda de corriente con doble etapa, que comprende un núcleo de transformador de corriente y un núcleo de medición, siendo el núcleo de transformador de corriente un núcleo magnético, siendo el núcleo magnético un núcleo enrollado nanocristalizado sin entrehierro localizado constituido por un material nanocristalino de composición atómica:



25 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' al menos uno de los elementos V, Cr, Al y Zn, siendo M'' al menos uno de los elementos C, Ge, P, Ga, Sb, In, Be, cuyo contenido de níquel es inferior a 4,5 %, que tiene una permeabilidad μ comprendida entre 200 y 1000, una saturación de más de 1 T, un intervalo de inducción en el que la permeabilidad no varía en más de un 5 % superior a 0,9 T, una inducción remanente inferior a 0,02 T y una frecuencia de corte superior a 1 MHz, y tal que μ varía en menos de 15 % cuando la temperatura varía entre -25 °C y +60 °C, y en menos de 25 % cuando la temperatura varía entre -40 °C y +120 °C.

3. Dispositivo según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado porque** la composición de la aleación nanocristalina es tal que, en % en átomos:

$$0,8\% \leq \text{Cu} \leq 1,2 \%$$

$$2,5\% \leq \text{Nb} \leq 3,5\%$$

$$12 \% \leq \text{Si} \leq 16,5\%$$

$$6 \% \leq \text{B} \leq 9\%$$

35 siendo el resto hierro e impurezas.

4. Dispositivo según la reivindicación 2, **caracterizado porque** constituye 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.

5. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque** es apto para medir una corriente que consta de una fuerte componente continua.

45

FIG. 1

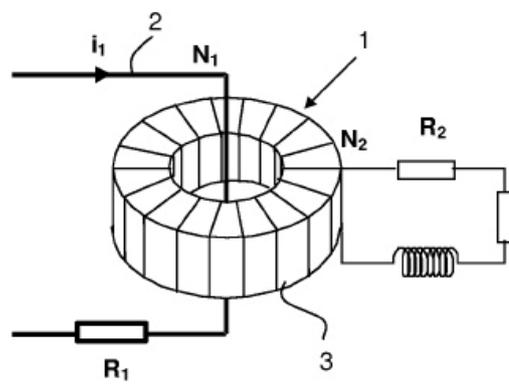


FIG. 2

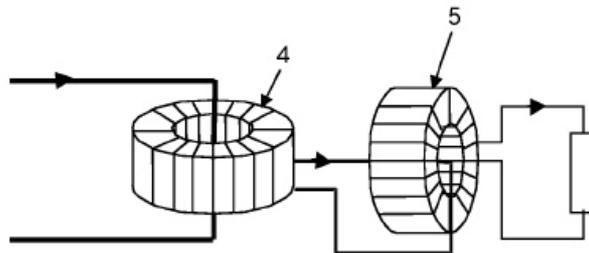


FIG. 3

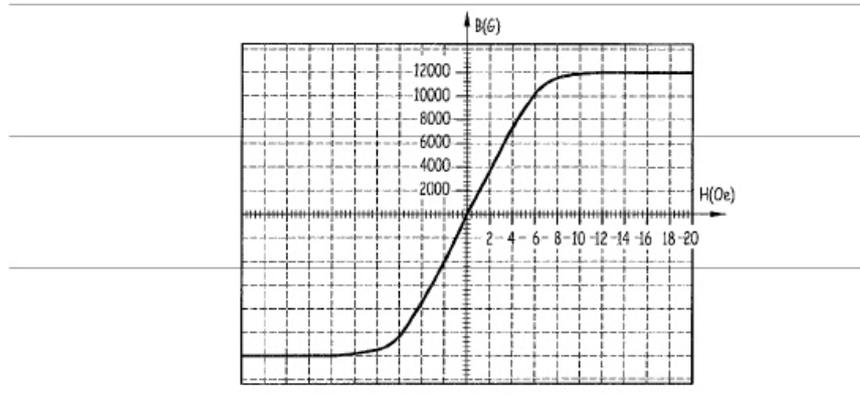


FIG. 4

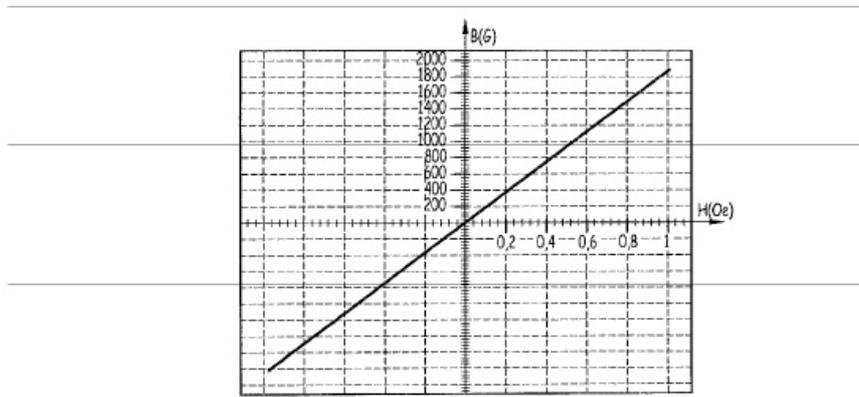


FIG. 5

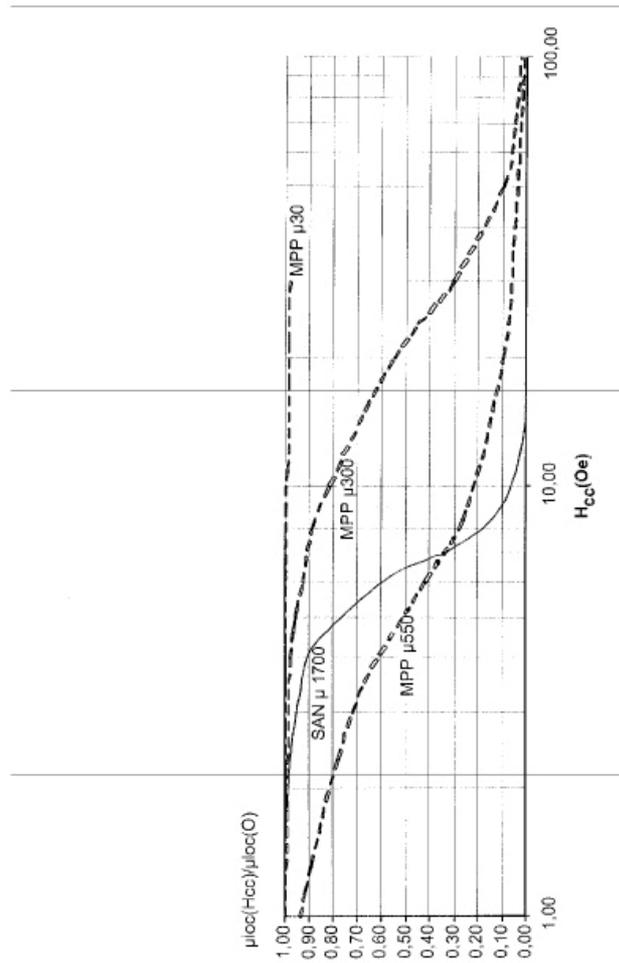


FIG. 6

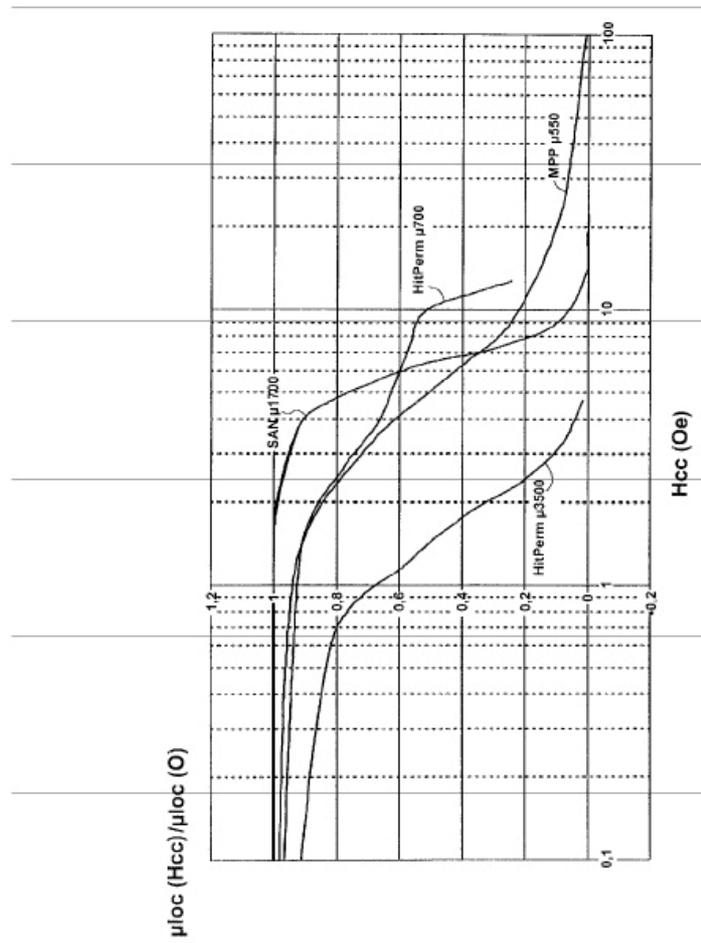


FIG. 7

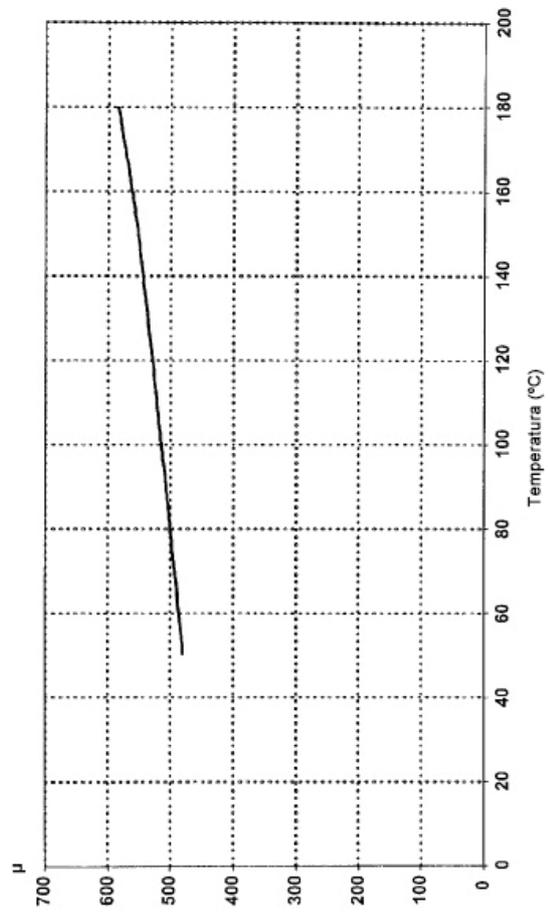


FIG. 8

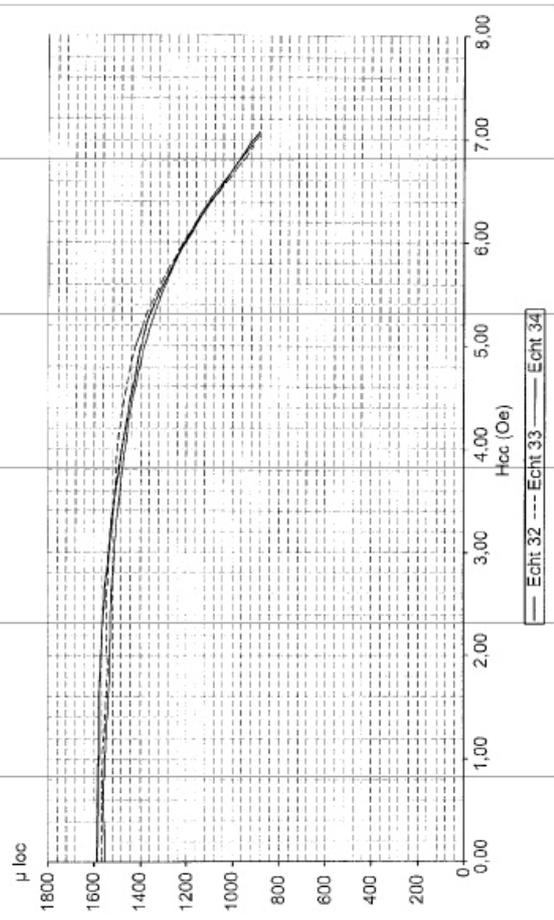


FIG. 9

