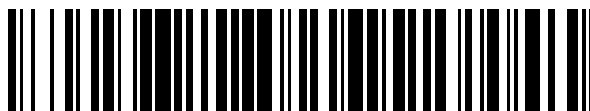


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 387 310**

51 Int. Cl.:  
**C22C 38/00** (2006.01)  
**C22C 38/02** (2006.01)  
**C22C 38/12** (2006.01)  
**C22C 38/16** (2006.01)  
**H01F 1/153** (2006.01)  
**H01F 41/02** (2006.01)  
**H01F 3/04** (2006.01)  
**C22C 45/02** (2006.01)

12

### TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **05745663 .4**  
96 Fecha de presentación: **17.05.2005**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1747566**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **31.01.2007**

54 Título: **Núcleo de transformador de corriente, así como procedimiento de producción de un núcleo de transformador de corriente**

30 Prioridad:  
**17.05.2004 DE 102004024337**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**20.09.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**20.09.2012**

73 Titular/es:  
**VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG**  
**GRÜNER WEG 37**  
**63450 HANAU, DE**

72 Inventor/es:  
**WULF, Günther;**  
**OTTE, Detlef y**  
**PETZOLD, Jörg**

74 Agente/Representante:  
**Lehmann Novo, Isabel**

**ES 2 387 310 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 de transformador de corriente, así como procedimiento de producción de un núcleo de transformador de corriente

5 La invención se refiere a un núcleo de transformador de corriente, así como a un procedimiento de producción de un núcleo de transformador de corriente.

10 Para determinar el consumo de energía de aparatos e instalaciones eléctricas en la industria y en el hogar se emplean contadores de energía. En tal caso, se conocen distintos principios, por ejemplo el del contador electromagnético de Ferraris que se basa en la medición de la rotación de un disco que es accionado por campos proporcionales de corriente o bien de tensión.

15 Los contadores modernos trabajan de forma totalmente electrónica. La determinación de la corriente se basa muchas veces en el principio inductivo, siendo elaboradas digitalmente señales de partida de transformadores de corriente y de tensión inductivos y pudiendo ser puestos a disposición para la determinación del consumo y luego para la lectura a distancia.

20 Los contadores electrónicos de energía con transformadores de corriente inductivos se emplean de manera creciente en los hogares. En tal caso, la aptitud de producción económica de contadores de este tipo juega, en parte, todavía un mayor papel que su superioridad técnica. Esto hace necesaria la explotación de procedimientos de producción particularmente rentables para transformadores de corriente de este tipo. Las corrientes de consumo a medir se encuentran en el intervalo entre algunos mA y 100 A o por encima, fomentándose una medición de la energía, capaz de ser calibrada y precisa, con un correspondientemente pequeño error de fase y amplitud de la señal de medición

25 con respecto a la corriente primaria a medir. Junto a los requisitos de precisión, se convierten también en importantes, en el caso de números elevados de aparatos, también los costes de los materiales para transformadores de corriente de este tipo, por consiguiente, en particular, también los costes para el material del núcleo del transformador.

30 En general, para el error de fase de un transformador de corriente se cumple

$$\tan \varphi \approx \frac{R_{Cu} + R_B}{\omega \cdot L} \cdot \cos \delta \tag{1}$$

R<sub>B</sub> = resistencia de la potencia nominal;

R<sub>Cu</sub> = resistencia del devanado secundario;

δ = ángulo de pérdida del material del transformador;

35 L = inductividad del lado secundario del transformador de corriente.

Para el error de amplitud se cumple

$$F(I) \approx - \frac{R_{Cu} + R_B}{\omega \cdot L} \cdot \text{sen} \delta \tag{2}$$

La inductividad L se define en tal caso como

$$L = N_2^2 \cdot \mu' \cdot \mu_0 \cdot \frac{A_{Fe}}{l_{Fe}} \tag{3}$$

40 N<sub>2</sub> = número de devanados secundarios

μ' = permeabilidad del material del transformador (parte real)

μ<sub>0</sub> = constante de permeabilidad general

A<sub>Fe</sub> = sección transversal del hierro del núcleo

45 L<sub>Fe</sub> = longitud media del recorrido del hierro del núcleo.

Por lo tanto, para la realización de transformadores de corriente de menor volumen, y con ello, más económicos, pero de alta precisión, existe la demanda de núcleos con una permeabilidad lo más elevada posible.

50 Para determinar grandes corrientes, el núcleo del transformador requiere un gran diámetro interno, lo cual, en el caso de una sección transversal del hierro A<sub>Fe</sub> pequeña, conduce a una pequeña relación del diámetro externo del núcleo D<sub>a</sub> al diámetro interno del núcleo D<sub>i</sub> de habitualmente < 1,5 o incluso < 1,25. Relaciones de diámetros pequeñas de este tipo conducen, no obstante, a una elevada inestabilidad mecánica del núcleo y hacen a éste sensible frente a

todo tipo de manipulación mecánica.

Por los motivos mencionados, como materiales para núcleos de transformadores de corriente de este tipo se emplean hasta ahora materiales muy permeables, por ejemplo ferritas o materiales de Permalloy (aleaciones magnéticas de níquel y hierro). En tal caso, las ferritas tienen, sin embargo, el inconveniente de que la permeabilidad es comparativamente baja y depende de manera relativamente intensa de la temperatura. Los materiales de Permalloy poseen la propiedad de que ciertamente se consigue un error de fase bajo, pero éste varía grandemente con la corriente a medir o bien la excitación completa del núcleo magnético. Ciertamente, mediante una correspondiente conexión electrónica del transformador o un tratamiento ulterior digital de los valores de medición, es posible una compensación de esta variación, pero esto representa una complejidad adicional costosa. Debido a la sensibilidad a la rotura de las ferritas así como de la elevada magnetostricción y la baja inducción de saturación de las dos clases de materiales, no se pueden conseguir núcleos de transformadores con una sección transversal del hierro pequeña, ahorradora de material, es decir, una pequeña relación de los diámetros  $D_a/D_i$ .

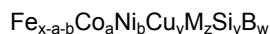
Del estado conocido de la técnica, por ejemplo del documento EP 05 04674 B1, se conoce también la aplicación de núcleos magnéticos muy permeables a base de materiales nanocristalinos con una elevada inducción de saturación que, al contrario de la invención presentada, poseen, no obstante, un bucle de histéresis plano. De ello resulta, en el caso de las permeabilidades alcanzables con ello ( $\mu$  aprox. 60.000 a 120.000) la obligatoriedad del dimensionamiento de núcleos de transformadores de corriente con una  $A_{Fe}$  grande. A pesar de, por lo demás, buenas propiedades, en particular en relación con la transferencia de fases, se hace con ello imposible un empleo rentable en la producción en masa.

En el documento WO 03/0071316 A2 se describe un proceso de alimentación continua para la cristalización de núcleos magnéticos a base de materiales nanocristalinos, en el que, en una etapa de recocido subsiguiente, se puede ajustar, por medio de un campo magnético aplicado, la forma del bucle de histéresis de los núcleos magnéticos. Sin embargo, no se redujo la relación de diámetros  $D_a/D_i$  de los núcleos magnéticos producidos con este procedimiento.

La presente invención se basa en la misión de indicar un núcleo de transformador de corriente muy altamente permeable a lo largo de un amplio intervalo de inducción, económico, así como un procedimiento para la producción de un núcleo de transformador de corriente altamente permeable de este tipo.

La misión se resuelve con los objetos de las reivindicaciones independientes. Perfeccionamientos ventajosos resultan de las reivindicaciones dependientes.

De acuerdo con la invención, el problema se resuelve mediante la habilitación de núcleos de transformadores de corriente con una relación de diámetro externo del núcleo  $D_a$  a diámetro interno del núcleo  $D_i < 1,25$ , que presentan una magnetostricción de saturación  $\lambda_s \leq |4|$  ppm, un bucle de histéresis redondo con  $0,50 \leq Br/B_s \leq 0,85$  y una  $H_{cmáx} \leq 20$  mA/cm, en donde los núcleos de transformadores de corriente se componen de una aleación magnética blanda a base de hierro, en la que al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, y la aleación a base de hierro presenta, en esencia, la siguiente composición:



en donde M es un elemento del grupo de V, Nb, W, Ta, Zr, Hf, Ti, Mo o una combinación de estos, y se cumple adicionalmente:

$$x + y + z + v + w = 100\% \text{ con}$$

$$Fe + Co + Ni = x = 100\% - y - z - v - w$$

Co	$a \leq 1,5$ en %
Ni	$b \leq 1,5$ en %
Cu	$0,5 \leq y \leq 2$ en %
M	$z \leq 5$ en %
Si	$6,5 \leq v \leq 18$ en %
B	$5 \leq w \leq 14$ en %

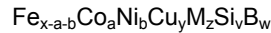
en donde  $v + w > 18$  en %. Por la relación  $Br/B_s$  se entiende aquí la relación de inducción de remanencia  $Br$  e inducción de saturación  $B_s$ .

Se prefieren núcleos de transformadores de corriente con una magnetostricción de saturación  $\lambda_s \leq |2|$  ppm, un bucle

## ES 2 387 310 T3

de histéresis redondo con  $0,50 \leq Br/Bs \leq 0,85$  y una  $H_{cm\acute{a}x} \leq 10$  mA/cm, en donde los núcleos de transformadores de corriente se componen de una aleación magnética blanda a base hierro, en la que al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, y la aleación a base de hierro presenta, en esencia, la siguiente composición:

5



en donde M es un elemento del grupo de V, Nb, W, Ta, Zr, Hf, Ti, Mo o una combinación de estos, y se cumple adicionalmente:

10

$$\begin{aligned} x + y + z + v + w &= 100\% \text{ con} \\ Fe + Co + Ni &= x = 100\% - y - z - v - w \end{aligned}$$

15

Co	$a \leq 0,5$ en %
Ni	$b \leq 0,5$ en %
Cu	$0,75 \leq y \leq 1,25$ en %
M	$2 \leq z \leq 3,5$ en %
Si	$13 \leq v \leq 16,5$ en %
B	$5 \leq w \leq 9$ en %

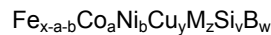
20

en donde  $20 \leq v + w \leq 25$  en %.

Se prefieren núcleos de transformadores de corriente con una magnetostricción de saturación  $\lambda_0 \leq |0,8|$  ppm, un bucle de histéresis redondo con  $0,65 \leq Br/Bs \leq 0,80$  y una  $H_{cm\acute{a}x} \leq 10$  mA/cm, en donde los núcleos de transformadores de corriente se componen de una aleación magnética blanda a base hierro, en la que al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, y la aleación a base de hierro presenta, en esencia, la siguiente composición:

25

30



en donde M es un elemento del grupo de V, Nb, W, Ta, Zr, Hf, Ti, Mo o una combinación de estos, y se cumple adicionalmente:

35

$$\begin{aligned} x + y + z + v + w &= 100\% \text{ con} \\ Fe + Co + Ni &= x = 100\% - y - z - v - w \end{aligned}$$

40

Co	$a \leq 0,5$ en %
Ni	$b \leq 0,5$ en %
Cu	$0,75 \leq y \leq 1,25$ en %
M	$2 \leq z \leq 3,5$ en %
Si	$13 \leq v \leq 16,5$ en %
B	$5 \leq w \leq 9$ en %

45

Típicamente, los núcleos de transformadores de corriente presentan una permeabilidad a  $H = 4$  mA/cm a una frecuencia de 50 Hz o 60 Hz de  $\mu > 90.000$  y poseen una permeabilidad máxima  $\mu_{m\acute{a}x} > 350.000$  a una frecuencia de 50 Hz o 60 Hz. Además, los núcleos de transformadores de corriente presentan una inducción de saturación de  $B_s \leq 1,4$  Tesla. En ejecuciones preferidas, los núcleos de transformadores de corriente presentan permeabilidades  $\mu_1$  a 1 mA/cm de  $\mu_1 > 90.000$ , más preferiblemente de  $\mu_1 > 140.000$  y, de manera óptima, de  $\mu_1 > 180.000$ .

50

Núcleos de transformadores de corriente de este tipo se adecuan extraordinariamente para su empleo en un transformador de corriente con un error de fase  $< 1^\circ$ . En tal caso, los núcleos de transformadores de corriente están configurados típicamente como núcleos de banda anular con al menos un devanado primario y al menos un devanado secundario.

55

La invención habilita, además, un procedimiento para la producción de núcleos de transformadores de corriente en forma de anillo de un material nanocristalino con bucle de histéresis redondo. Actualmente, núcleos mecánicamente muy sensibles de este tipo no se pueden producir técnica y de manera rentablemente satisfactoria con los procedimientos hasta ahora conocidos, en particular tratamiento térmico en apilamiento en el horno de retorta. El problema se cumple, de acuerdo con la invención, mediante un procedimiento para la producción de núcleos de transformadores de corriente en forma de anillo con una relación de diámetro externo del núcleo  $D_a$  a diámetro

60

interno del núcleo  $D_i < 1,5$ , que se componen de una aleación magnética blanda a base de hierro, en donde al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, con las siguientes etapas:

- 5 a) habilitar una masa fundida de la aleación;
- b) producir una banda de aleación amorfa a partir de la masa fundida de la aleación por medio de tecnología de consolidación instantánea;
- c) arrollamiento exento de tensión de la banda amorfa para formar núcleos de transformadores de corriente amorfos;
- 10 d) tratamiento térmico de los núcleos de transformadores de corriente amorfos no apilados, p. ej. en continuo, para formar núcleos de transformadores de corriente nanocristalinos bajo exclusión amplísima de la influencia de campos magnéticos, produciendo los núcleos de transformadores de corriente en forma de anillo con una relación de diámetro externo del núcleo  $D_a$  a diámetro interno del núcleo  $D_i < 1,25$  y realizándose el tratamiento térmico en un intervalo de temperaturas de
- 15 aprox. 440°C hasta aprox. 620°C, y en donde en el caso del tratamiento térmico en un intervalo de temperaturas de aprox. 440°C hasta aprox. 620°C existe una primera fase de calentamiento y una segunda fase de calentamiento, cuya tasa de calentamiento es menor que la de la primera fase de calentamiento.

20 A ello le sigue, típicamente, la consolidación escalonada del núcleo, p. ej. mediante impregnación, revestimiento, recubrimiento con un material sintético adecuado y/o encapsulación.

Con ello, se pueden producir núcleos de transformadores de corriente con bucles de histéresis redondos altísimamente permeables con una zona de inducción ampliamente aprovechable en virtud de la elevada inducción de saturación de  $B_s = 1,1$  a 1,4 T y un buen paso de frecuencia en relación con la permeabilidad y pérdidas de re-

25 magnetización comparativamente bajas.

En el caso de transformadores de corriente, en las composiciones de la aleación destacadas como "preferibles" se alcanzan propiedades particularmente buenas, dado que con un tratamiento térmico adaptado se puede ajustar de

30 manera conocida un paso por cero de la magnetostricción de saturación.

Con un material magnético de este tipo se pueden producir ventajosamente núcleos nanocristalinos con un bucle de histéresis redondo, en los que la relación  $B_r/B_s$ , es decir, la densidad de flujo remanente, dividida por la densidad de flujo de saturación es mayor que 0,5 y hasta 0,85. Además, la permeabilidad  $\mu_i$  puede ser  $> 100.000$ ,  $\mu_{m\acute{a}x} > 350.000$

35 y se alcanza una inducción de saturación que puede oscilar entre 1,1 T y 1,4 T. Debido a la elevada permeabilidad inicial y máxima y a la elevada inducción de saturación, se pueden reducir esencialmente la sección transversal del hierro y, con ello, el peso y el precio del núcleo del transformador para el acabado en masa.

Aleaciones magnéticas blandas a base de hierro, nanocristalinas, son conocidas desde hace mucho tiempo y se describieron, por ejemplo, en el documento EP 0 271 657 B1 así como en el documento WO 03/007316 A2.

40

En los dos sistemas de aleación descritos en el documento WO 03/007316 A2, al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor. Estas aleaciones magnéticas blandas nanocristalinas se emplean en medida creciente como núcleos magnéticos en inductividades para las diversas aplicaciones electrotécnicas. Esto se deduce, por ejemplo, del documento EP 0 299 498 B1.

45

Las aleaciones nanocristalinas en cuestión pueden producirse mediante la denominada tecnología de consolidación instantánea (por ejemplo mediante hilatura en masa fundida o colada de flujo laminar). En tal caso, primero se habilita una masa fundida de la aleación en la que, a continuación, mediante enfriamiento brusco, se produce a partir del estado fundido una banda de aleación en principio amorfa. Las velocidades de enfriamiento requeridas para los sistemas de aleación en cuestión anteriores, ascienden en tal caso a aproximadamente  $10^6$  K/s. Esto se alcanza con ayuda del procedimiento de hilatura en masa fundida, en el que la masa fundida es inyectada a través de una tobera estrecha sobre un rodillo de refrigeración que gira a gran velocidad y, en tal caso, se consolida para formar una

50 banda delgada. Este procedimiento hace posible la producción continua de bandas delgadas y láminas en un único paso de trabajo, directamente a partir de la masa fundida con una velocidad de 10 a 50 m/s, siendo posibles espesores de banda de 14 a 50  $\mu\text{m}$  y anchuras de banda de hasta algunos cm.

55

La banda en principio amorfa, producida mediante esta tecnología de consolidación instantánea, se enrolla luego para formar núcleos magnéticos ampliamente variables desde un punto de vista geométrico, pudiendo ser éstos ovalados, rectangulares o redondos.

60

La etapa principal para alcanzar buenas propiedades magnéticas blandas es la “nanocristalización” de las bandas de aleación hasta entonces todavía amorfas. Estas bandas de aleación presentan, desde un punto de vista magnético blando, todavía malas propiedades, dado que presentan una magnetostricción  $|\lambda_s|$  relativamente elevada de aprox.  $25 \times 10^{-6}$ . En el caso de la realización de un tratamiento térmico de cristalización ajustado a la aleación, se forma entonces una estructura ultrafina, es decir, se forma una estructura de la aleación en la que al menos el 50% del volumen está ocupado por cristalitas de FeSi centrados en el espacio de forma cúbica. Estos cristalitas están embutidos en una fase residual amorfa a base de metales y metaloides. Los antecedentes físicos de cuerpos sólidos para la formación de la estructura finamente cristalina y la mejora drástica con ello concomitante de las propiedades magnéticas blandas se describe, por ejemplo, en G. Herzer, IEEE Transactions on Magnetics, 25 (1989), páginas 3327 y siguientes. Según esto, resultan buenas propiedades magnéticas blandas tales como una elevada permeabilidad o pequeñas pérdidas de la histéresis mediante la compensación de la anisotropía cristalina  $K_1$  de la “estructura” nanocristalina orientada al azar.

Según el estado conocido de la técnica de los documentos EP 0 271 657 B1 o bien EP 0 299 498 B1, las bandas amorfas son enrolladas primeramente en bobinadoras especiales, de la forma más exenta de tensión posible, para formar núcleos de bandas anulares. Para ello, la banda amorfa se enrolla primeramente para formar un núcleo de banda anular redondo y – en caso necesario – se lleva, mediante útiles de conformación adecuados, a una forma que se aparta de la forma redonda. Mediante el uso de carretes adecuados, se pueden alcanzar, sin embargo, también directamente en el arrollamiento de las bandas amorfas para formar núcleos de bandas anulares, formas que se apartan de la forma redonda.

Después, los núcleos de banda anular enrollados exentos de tensión según el estado conocido de la técnica se someten, en los denominados hornos de retorta, a un tratamiento térmico de cristalización que sirve para conseguir la estructura nanocristalina. En este caso, los núcleos de banda anular se apilan uno sobre otro y se introducen en un horno de este tipo. Se ha demostrado que un inconveniente decisivo de este procedimiento estriba en que mediante débiles campos de dispersión magnéticos tales como, p. ej., el campo magnético terrestre, se induce una dependencia de la posición de los valores magnéticos en la pila de núcleos magnéticos. Mientras que en los bordes de la pila se presentan, por ejemplo, elevados valores de permeabilidad con una relación de remanencia elevada, intrínsecamente condicionada, de más de 60%, los valores magnéticos en la zona del medio del apilamiento de distinguen por bucles de histéresis planos, pronunciados en mayor o menor medida, con bajos valores en relación con la permeabilidad y remanencia. Junto a ello, un recocido de la pila llevado a cabo en los núcleos específicos para el transformador de corriente, en particular con una pequeña relación  $D_a/D_i$ , puede conducir a deformaciones mecánicas considerables que tienen como consecuencia un empeoramiento de las propiedades magnéticas.

En el caso de los sistemas de aleación nanocristalinos en cuestión, el ajuste de la estructura nanocristalina tiene lugar típicamente a temperaturas de  $T_a = 440^\circ\text{C}$  a  $620^\circ\text{C}$ , pudiendo encontrarse los tiempos de parada necesarios entre unos pocos minutos y aprox. 12 horas. En particular, del documento US 5.911.840 se desprende que en el caso de núcleos magnéticos nanocristalinos con un bucle B-H redondo se puede alcanzar una permeabilidad máxima de  $\mu_{\text{máx}} = 760.000$  cuando se utiliza una meseta de temperaturas estacionaria con una duración de 0,1 a 10 horas por debajo de la temperatura de  $250^\circ\text{C}$  a  $480^\circ\text{C}$  necesaria para la cristalización, para la relajación del núcleo magnético. No obstante, esto incrementa la duración del tratamiento térmico y reduce, con ello, la rentabilidad.

Mediante la individualización de acuerdo con la invención de los núcleos de transformadores de corriente durante el tratamiento térmico se provoca una condición magnetostática idéntica para cada uno de los núcleos de banda anular individuales. En tal caso, el factor de desmagnetización grande del núcleo individual, a diferencia de la pila de núcleos, impide una magnetización en dirección axial. La consecuencia de esta condición de cristalización magnetostática idéntica para cada uno de los núcleos del transformador individuales proporciona una limitación de las dispersiones de los valores magnéticos a causas específicas para la aleación, geométricas y/o térmicas. De esta forma pueden excluirse concentraciones de campo condicionadas por la pila.

Para minimizar anisotropías magneto-elásticas que conducirían a una disminución de la permeabilidad, el tratamiento térmico con las composiciones de las aleaciones se ajusta de modo que las aportaciones de magnetostricción de grano finamente cristalino y fase residual amorfa se compensan entre sí y, por consiguiente, se alcanza una magnetostricción minimizada de  $\lambda_s < 2$  ppm, preferiblemente, incluso  $< 0,8$  ppm. Por otra parte, el procedimiento de alimentación continua descrito permite, a diferencia del recocido de la pila en hornos de retorta, un recocido exento de tensión de los núcleos. Esto último es de gran ventaja, precisamente en el caso de los núcleos de transformadores de corriente mecánicamente inestables la mayoría de las veces considerados en este caso, con una pequeña relación de diámetros  $D_a/D_i$ . Esto continúa reduciendo, por una parte, las anisotropías magneto-mecánicas, por otra parte los núcleos conservan, a pesar de una escasa estabilidad mecánica, su forma original, por lo general redonda. Además, es importante que en el caso del proceso de alimentación continuo, por el cual pasan los núcleos de transformadores de corriente individuales, no tenga lugar contacto alguno entre sí ni con otras partes que pudiera tener como consecuencia una deformación o arriostamiento y que, por otra parte, se consiga una atmósfera de gas

protector que conduzca a que se evite una oxidación o cristalización de la superficie. Para este fin puede estar prevista una atmósfera de gas reductora, en particular con un gas seco.

5 Con el fin de cumplir los requisitos condicionados por la aplicación en una pequeña parte imaginaria de la permeabilidad compleja, lo cual es necesario en relación con la reducción de las pérdidas de remagnetización, se ha manifestado ventajoso que la banda amorfa sea revestida de manera eléctricamente aislante antes del arrollamiento. Esto conduce a un pequeño ángulo de pérdida  $\delta$  y, con ello, a la minimización del error de amplitud en la ecuación (2).

10 En función de los requisitos, el revestimiento puede realizarse, a elección, mediante un proceso de inmersión, de alimentación continua, de pulverización o de electrolisis. También puede estar previsto que el núcleo del transformador de corriente sea sumergido después del arrollamiento en un medio aislante.

15 El medio aislante se ha de elegir de modo que éste se adhiera, por una parte, a la superficie de la banda, por otra parte no provoque reacciones en la superficie que pudieran conducir a un deterioro de las propiedades magnéticas. En relación con el presente sistema de aleación, se han acreditado óxidos, acrilatos, fosfatos, silicatos y cromatos de los elementos Ca, Mg, Al, Ti, Zr, Hf, Si.

20 Como particularmente ventajoso se ha manifestado aplicar sobre la superficie de la banda un producto previo con contenido en magnesio, líquido, que durante un tratamiento térmico especial, que no influye sobre la aleación, se transforma en una capa densa a base de óxido de magnesio, cuyo espesor puede oscilar aproximadamente entre 30 nm y 1 mm y que se adhiere firmemente sobre la superficie de la banda.

25 Después del tratamiento térmico, el núcleo magnético es consolidado finalmente, p. ej. mediante impregnación, revestimiento, recubrimiento con materiales sintéticos adecuados y/o encapsulación.

30 En el caso de la encapsulación, p. ej. mediante el pegado en artesas protectoras se ha de tener cuidado sobre una variación, condicionada por la tensión, de los errores de amplitud y de fase con la temperatura. En el caso de utilizar un pegamento elástico blando se demostró que una variación en la temperatura conduce a desviaciones de la linealidad adicionales elevadas de los errores del transformador con respecto a la temperatura ambiente y también a bajas temperaturas. En este caso, se manifiestan tensiones de tracción y de compresión en el núcleo que son transmitidas del material de la artesa debido al comportamiento elástico del pegamento endurecido. Una clara reducción de este efecto pudo alcanzarse debido a que como masa de relleno se utilizó, en lugar de un pegamento de reacción elástico blando, una pasta no reactiva elástica blanda. Con ello, los valores de la linealidad pudieron mantenerse casi constantes dentro del intervalo de temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ .

35 La invención se refiere, además de al procedimiento para la producción de núcleos de transformadores de corriente de acuerdo con la reivindicación 1, también a los núcleos de transformadores de corriente producidos según este procedimiento para transformadores de corriente con un error de fase de  $< 1^{\circ}$ .

40 Se ha comprobado que mediante el tratamiento térmico descrito con las condiciones ambientales asimismo descritas y con el sistema de aleación indicado se pueden conseguir errores de fase particularmente pequeños en el caso de transformadores de corriente con los núcleos de transformadores de corriente así producidos.

45 Para ello, en la producción de un transformador de corriente debe preverse en cada caso, además, un devanado primario y un devanado secundario.

50 En resumen, para alcanzar un bucle de histéresis redondo con una permeabilidad inicial y máxima elevadas, o bien un campo de coercividad bajo ( $H_c < 15 \text{ mA/cm}$ ) son importantes o bien ventajosas las siguientes condiciones, en particular con el fin de no generar, después del tratamiento térmico, anisotropías con energías de anisotropía  $K_{\text{ges}} > 2 \text{ J/m}^3$ :

55 I. deben evitarse campos magnéticos externos durante el tratamiento térmico, también aquellos que resultan mediante la concentración de flujo del campo magnético terrestre

II. evitar tensiones dentro del material de la banda, por ejemplo mediante oxidación de la superficie o cristalización

60 III. evitar arriostramientos durante el tratamiento térmico dentro del núcleo o desde el exterior sobre el núcleo mediante arrollamiento exento de tensión, disposición para el recocido y compensación de la magnetostricción en el procedimiento de tratamiento térmico

IV. evitar arriostramientos en la consolidación

V. evitar arriostramientos en el empleo de los núcleos de transformadores de corriente, es decir, durante el arrollamiento y durante la incorporación en transformadores de corriente.

5  
Mediante el procedimiento de acuerdo con la invención es posible la fabricación de núcleos de transformadores mecánicamente más inestables, que presentan una relación de diámetro externo del núcleo a diámetro interno del núcleo  $< 1,5$ , en particular incluso  $< 1,25$ . Núcleos de transformadores de este tipo no se pueden producir con los métodos habituales, en particular cuando son apilados durante el tratamiento térmico, dado que son fácilmente dañados, por ejemplo, durante la manipulación o el transporte en el horno, o constituyen tensiones internas.

10  
Durante el proceso de cristalización, es decir, durante el tratamiento térmico descrito, se debe tener en cuenta que se trata de una reacción exotérmica y que el calor de la reacción que se libera debe ser evacuado del núcleo. Preferiblemente, el tratamiento térmico de los núcleos de bandas anulares amorfos no apilados se lleva a cabo en disipadores de calor que presentan una elevada capacidad térmica y una elevada conductividad térmica. El principio del disipador de calor ya se conoce por el documento JP 03 146 615 A2. No obstante, allí se emplean disipadores sólo en el caso de recocidos estacionarios. En tal caso, como material para los disipadores de calor entra en consideración, en particular, un metal o una aleación metálica. En particular, se han manifestado particularmente adecuados los metales cobre, plata, así como acero conductor del calor.

15  
Sin embargo, también es posible llevar a cabo el tratamiento térmico en un disipador de calor a base de material cerámico. Además de ello, también es imaginable una ejecución de la presente invención en la que los núcleos de bandas anulares amorfos a tratar con calor se incorporen en un lecho del molde de polvo de material cerámico o polvo metálico, preferiblemente polvo de cobre.

20  
En calidad de materiales cerámicos, tanto para una placa cerámica maciza como para un lecho de polvo de material cerámico se han manifestado particularmente ventajosos, en particular, óxido de magnesio, óxido de aluminio y nitruro de aluminio.

25  
El tratamiento térmico para la cristalización se lleva a cabo en un intervalo de temperaturas de aprox. 450°C hasta 620°C. En tal caso, el transcurso se subdivide normalmente en diferentes fases de temperatura para iniciar el proceso de cristalización y para la maduración de la estructura, es decir, para la compensación de la magnetostricción.

30  
El tratamiento térmico de acuerdo con la invención se lleva a cabo preferiblemente con un horno, presentando el horno una carcasa de horno que presenta al menos una zona de recocido y una fuente de caldeo, medios para la carga de la zona de recocido con núcleos magnéticos amorfos no apilados, medios para el transporte de los núcleos magnéticos no apilados a través de la zona de recocido y medios para la retirada de los núcleos magnéticos nanocristalinos tratados con calor no apilados a partir de la zona de recocido.

35  
Preferiblemente, la zona de recocido de un horno de este tipo se solicita con un gas protector.

40  
En una primera forma de realización de la presente invención, en tal caso la carcasa del horno presenta la forma de un horno de torre, en el que la zona de recocido discurre verticalmente. Los medios para el transporte de los núcleos magnéticos amorfos no apilados a través de la zona de recocido que discurre verticalmente son en tal caso preferiblemente una cinta transportadora que discurre verticalmente.

45  
La cinta transportadora que discurre verticalmente presenta, en tal caso, apoyos dispuestos perpendicularmente a la superficie de la cinta transportadora, a base de un material con una elevada capacidad térmica, es decir, de los metales descritos al comienzo o de los materiales cerámicos descritos al comienzo, los cuales presentan una elevada capacidad térmica y una elevada conductividad térmica. Los núcleos de banda anular se encuentran en tal caso sobre los apoyos.

50  
La zona de recocido que discurre verticalmente está subdividida en tal caso, preferiblemente, en varias zonas de caldeo separadas que están provistas de regulaciones de caldeo separadas.

55  
En una forma de realización alternativa del horno de acuerdo con la invención, éste presenta la forma de un horno de torre en el que la zona de recocido discurre horizontalmente. En tal caso, la zona de recocido que discurre horizontalmente está subdividida, de nuevo, en varias zonas de caldeo separadas que están provistas de regulaciones de caldeo separadas. Como medios para el transporte de los núcleos de banda anular amorfos no apilados a través de la zona de recocido que discurre horizontalmente está prevista entonces al menos una, pero preferiblemente varias placas de apoyo que giran a modo de carrusel en torno al eje del horno de torre.



5 Las placas de apoyo sobre las que se apoyan los núcleos de los transformadores se componen, de nuevo, en su totalidad o en parte de un material con una elevada capacidad térmica y una elevada conductividad térmica. En este caso, entran particularmente en consideración placas que se componen de los metales mencionados al comienzo tales como, p. ej., cobre, plata o acero conductor del calor, o de materiales cerámicos.

10 En una tercera forma de realización alternativa del horno, éste presenta una carcasa de horno que presenta la forma de un horno continuo horizontal en el que la zona de recocido discurre de nuevo horizontalmente. Esta forma de realización es particularmente preferida, ya que un horno de este tipo se puede producir de manera relativamente sencilla.

15 En tal caso, como medio para el transporte de los núcleos de transformador amorfos no apilados a través de la zona de recocido que discurre horizontalmente está prevista una cinta transportadora, en donde la cinta transportadora está provista preferiblemente de nuevo con apoyos que se componen de un material con una elevada capacidad térmica y una elevada conductividad térmica, sobre los que se apoyan los núcleos de banda anular. En tal caso, entran en consideración de nuevo los materiales metálicos y/o cerámicos comentados al comienzo.

20 Típicamente, también aquí, la zona de recocido que discurre horizontalmente está subdividida de nuevo en varias zonas de caldeo separadas que están provistas de regulaciones de caldeo separadas.

La invención se explica a modo de ejemplo en lo que sigue con ayuda de los dibujos. En tal caso muestran:

25 Figura 1, esquemáticamente en sección transversal, un horno de torre con una cinta transportadora que discurre verticalmente,

Figura 2, un horno de carrusel de varios pisos,

Figura 3, un horno continuo con una cinta transportadora que discurre horizontalmente,

30 Figura 4, esquemáticamente un transformador de corriente,

Figura 5, un circuito de reemplazo de un transformador de corriente,

35 Figura 6, el comportamiento de fase de un núcleo de transformador de acuerdo con la invención,

Figura 7, una perspectiva sobre las propiedades de permeabilidad de núcleos de transformador de diferentes materiales magnéticos, tras un tratamiento térmico diferente,

40 Figuras 8a, 8b, 8c, el estado de núcleos de banda anulares típicos de transformadores de corriente con una pequeña relación  $D_a/D_i$ , después de recocido continuo (8a) y después de recocidos en la pila sin (8b) y con (8c) campo magnético y

45 Figuras 9b, 9b errores de amplitud y de fase de transformadores de corriente constituidos por núcleos de transformadores consistentes en diferentes materiales.

50 En particular, para la producción de los denominados bucles de histéresis redondos se requieren procedimientos de recocido que permitan la formación y maduración de una estructura nanocristalina ultrafina bajo condiciones lo más exentas de campo y térmicamente exactas posibles. Como se mencionó al comienzo, según el estado conocido de la técnica, el recocido se realiza normalmente en denominados hornos de retorta en los que los núcleos de transformadores son introducidos apilados uno sobre otro.

55 El inconveniente decisivo de este procedimiento es que mediante débiles campos de dispersión tales como, p. ej., el campo magnético terrestre o campos de dispersión similares, se induce una dependencia de la posición de los valores característicos magnéticos en la pila de núcleos magnéticos por parte de efectos de desviación de campo y de formación de concentraciones.

60 Junto a los efectos magnetostáticos, el recocido de la pila en hornos de retorta posee el inconveniente adicional de que con el peso creciente del núcleo magnético, el calor exotérmico del proceso de cristalización sólo puede ser transmitido de manera incompleta al entorno. La consecuencia de ello es un sobrecalentamiento de los núcleos magnéticos apilados que puede conducir a permeabilidades más bajas y a intensidades de campo de coercividad elevadas. Para evitar estos problemas, en la zona de la cristalización que se inicia, es decir por lo tanto a partir de aprox. 450°C, se procede a un calentamiento muy lento, lo cual no es rentable. Tasas de calentamiento típicas se

encuentran en dicha zona en 0,1 a 0,2 K/min, por lo que sólo el recorrido de la zona hasta 490°C puede durar hasta 7 horas.

5 La única alternativa a gran escala, realizable de manera rentable, para el recocido de la pila en el horno de retorta se encuentra en un recocido en continuo de núcleos de transformador individuales separados. Mediante la individualización de los núcleos de transformador mediante el procedimiento de alimentación continua, se crean condiciones magnetostáticas y térmicas idénticas para cada uno de los núcleos de transformador individuales.

10 La tasa de calentamiento, típicamente rápida para recocidos en continuo, puede conducir, incluso en el caso de núcleos magnéticos individualizados, a un desarrollo exotérmico de calor que provoca un deterioro creciente con el peso del núcleo de las propiedades magnéticas. Este efecto puede ser contrarrestado mediante un calentamiento más lento.

15 Sin embargo, dado que un calentamiento retardado pudiera conducir a una multiplicación no rentable de la longitud del tramo de recorrido, este problema puede resolverse mediante la introducción de bases absorbentes de calor (disipadores de calor) a base de metales bien conductores del calor o mediante lechos de polvo metálicos o cerámicos. Como particularmente adecuadas se han manifestado placas de cobre, dado que éstas poseen una elevada capacidad térmica específica y una muy buena conductividad térmica. Con ello, a los núcleos magnéticos se les puede extraer en el lado frontal el calor de cristalización generado de modo exotérmico. Además de ello, disipadores de calor de este tipo reducen la tasa de calentamiento real de los núcleos, con lo que se puede limitar adicionalmente la sobret temperatura exotérmica.

20 La capacidad térmica de los disipadores de calor se ha de adaptar, por ejemplo, mediante variación del grosor de la placa, a la masa y altura de los núcleos. En el caso de una adaptación óptima, se pueden alcanzar de esta manera, a lo largo de un amplio intervalo de pesos, valores característicos magnéticos extraordinarios ( $\mu_{\text{máx}}(50 \text{ Hz}) > 350.000$ ;  $\mu_4 > 900.000$ ). En el caso de la producción de acuerdo con la invención, estos valores conforme a la Fig. 7 son muy superiores a los de los núcleos de transformadores de corriente actuales a base de NiFe o de un material nanocristalino con bucle plano.

30 La Figura 1 muestra esquemáticamente un horno de torre para llevar a cabo el tratamiento térmico de acuerdo con la invención. En tal caso, el horno de torre presenta una carcasa de horno en la que la zona de recocido discurre verticalmente. Los núcleos de transformador amorfos no apilados son transportados en tal caso a través de una zona de recocido que discurre verticalmente a través de una cinta transportadora que discurre verticalmente.

35 La cinta transportadora que discurre verticalmente presenta, en tal caso, disipadores de calor a base de un material con una elevada capacidad térmica, preferiblemente cobre, dispuestos perpendicularmente a la superficie de la cinta transportadora. En tal caso, los núcleos de transformadores se apoyan con sus superficies frontales sobre las bases. La zona de recocido que discurre verticalmente está subdividida en tal caso en varias calefacciones separadas que están provistas de regulaciones de caldeo separadas.

40 En particular, en la Figura 1 se representan: extracción del género recocido 104, esclusas para el gas protector 105, 110, carga de género de recocido 109, zona de calentamiento con gas protector reductor o pasivo 107, zona de cristalización 133, zona de calentamiento 134, zona de maduración 106, cinta transportadora 108, carcasa de horno 132, superficie de apoyo 103 como disipador de calor para los núcleos de transformador 102, esclusa de gas protector 101.

45 En la Figura 2 está representada otra forma de realización de un horno de este tipo. También en este caso, de nuevo la forma del horno es la de un horno de torre, en el que, sin embargo, la zona de recocido discurre horizontalmente. En tal caso, la zona de recocido que discurre horizontalmente está subdividida de nuevo en varias zonas de calentamiento separadas que están provistas de regulaciones de caldeo separadas. Como medio para el transporte de los núcleos de banda anular amorfos, no apilados, a través de la zona de recocido que discurre horizontalmente, está prevista de nuevo una, pero preferiblemente varias placas de apoyo que giran en torno al eje del horno de torre, que sirven como disipadores de calor.

55 Las placas de apoyo se componen de nuevo, en su totalidad o en parte, de un material con una elevada capacidad térmica y elevada conductividad térmica sobre el que se apoyan los núcleos magnéticos con sus superficies frontales.

60 En la Figura 2 se pueden reconocer, en particular: superficie de apoyo rotatoria en calidad de disipador de calor 111, núcleos de transformador 112, carga de género de recocido 113, zona de recocido con gas protector reductor o pasivo 114, zona de calentamiento 115, zona de cristalización 116, zona de calentamiento 117, zona de maduración 118, extracción de género de recocido 121, recinto de caldeo con gas protector reductor o pasivo 120, esclusa de

gas protector 119.

5 La Figura 3 muestra finalmente una tercera forma de realización de un horno en el que la carcasa de horno presenta la forma de un horno continuo horizontal. En tal caso, la zona de recocido discurre de nuevo horizontalmente. Esta forma de realización es particularmente preferida, dado que un horno de este tipo se puede fabricar con una menor complejidad a diferencia de los dos hornos arriba mencionados.

10 En tal caso, los núcleos de transformador realizados como núcleos de banda anular son transportados a lo largo de una cinta transportadora a través de la zona de recocido que discurre horizontalmente, estando la cinta transportadora provista preferiblemente de nuevo de apoyos que sirven como disipadores de calor. Particularmente preferidas son de nuevo en este caso placas de cobre. En una ejecución alternativa del transporte, en calidad de disipadores de calor se toman placas que se deslizan sobre rodillos a través de la carcasa del horno.

15 Como se desprende de la Figura 3, la zona de recocido que discurre horizontalmente está subdividida de nuevo en varias zonas de calentamiento separadas que están provistas de regulaciones de caldeo separadas.

20 En la Figura 3 se representan, en particular: zona de lavado con gas protector pasivo 122, zona de calentamiento 123, zona de cristalización 124, zona de calentamiento 125, zona de maduración 126, zona de enfriamiento 127, zona de lavado con gas protector pasivo 128, núcleos de transformador 129, zona de recocido con gas protector 130, cinta transportadora 131.

25 La Figura 4 muestra esquemáticamente un transformador de corriente con un núcleo de transformador 1, un conductor de la corriente primario 2, así como un conductor secundario 3, enrollado en forma de una bobina sobre el núcleo del transformador. El núcleo del transformador 1 está realizado en forma de anillo circular y presenta los diámetros  $D_a$  (diámetro externo) y  $D_i$  (diámetro interno) representados en la figura. En tal caso,  $D_a$  y  $D_i$  se refieren al material magnético del núcleo. Como ya se ha descrito más arriba, los núcleos de transformadores de corriente se distinguen por pequeñas relaciones  $D_a/D_i$ , cumpliéndose  $D_a/D_i < 1,5$  o incluso  $< 1,25$ . Núcleos de transformadores que, al igual que aquí, se fabrican de un material nanocristalino con relaciones de diámetro pequeñas de este tipo, sólo se pueden producir con el procedimiento de tratamiento térmico de acuerdo con la invención sin arriostamientos y/o deformaciones.

30 El conductor primario 2 puede estar configurado, por una parte, como un único conductor que atraviesa el núcleo del transformador, pero, por otra parte, alternativamente, también como un devanado de manera similar al devanado del conductor secundario 3.

35 En la Figura 5 se muestra el circuito de reemplazo para un transformador de corriente representado de modo tridimensional en la Figura 4, designando símbolos de referencia idénticos a los mismos elementos.

40 La Figura 6 muestra, en una primera curva 4, la intensidad de campo del campo primario  $H_{prim}$ . Una segunda curva 5 muestra el campo contrario inducido o campo del transformador  $H_{sec}$ , y la tercera curva 6 muestra la densidad de flujo B en el núcleo del transformador.

En la figura se ha dibujado además, el error de fase  $\phi$  así como la diferencia angular entre  $H_{prim}$  y  $H_{sec}$ .

45 Seguidamente se representan algunos ejemplos de realización elegidos que deben explicar la invención con respecto al estado conocido de la técnica, en donde los Ejemplos 1 y 2 no son ejemplos de realización de la invención, sino ejemplos comparativos que facilitan la comprensión de la invención:

50 Ejemplo 1: A partir de Permalloy se produjo un núcleo de transformador conforme al estado conocido de la técnica, con las dimensiones 22 x 16 x 5,5 mm, con un factor de carga de 87% y un peso de 7,45 g. La permeabilidad a leer de la Fig. 7 (curva 11) se encontraba en  $\mu_4 = 170.000$ . Conforme a la Fig. 9a (curva 21) se alcanzó, con un número de devanados primarios de 1 un número de devanados secundarios de 2.500 y una resistencia de la potencia nominal 12,5  $\Omega$ , a una corriente nominal de 60 A, únicamente en una zona de corriente fuertemente delimitada, la misma exactitud que con el Ejemplo 3 de acuerdo con la invención: la zona de corriente representable máxima se encontraba, en virtud de la menor inducción de saturación de 0,74 T, sólo en 75 A; para corrientes por debajo 1 A, el error de fase  $\phi$  aumentó con respecto al Ejemplo 3 de una manera inaceptable.

60 Ejemplo 2: A partir de la aleación  $Fe_{75,5}Cu_1Nb_3Si_{12,5}B_8$  se enrolló un núcleo con las dimensiones de 47 x 38 x 5 mm (factor de carga 80%). El tratamiento térmico se llevó a cabo mediante recocido en una pila en un horno de retorta, teniendo lugar la maduración de la estructura y la compensación de la magnetostricción durante 1 hora a 567°C. A continuación, siguió un tratamiento térmico durante 3 horas a 422°C bajo campo

transversal. No obstante, para evitar un sobrecalentamiento exotérmico entre 430°C y 500°C se calentó de manera extremadamente lenta a razón de 0,1°C/min. Con ello, el tratamiento térmico llevado a cabo en H<sub>2</sub> total duró aprox. 19 horas y era muy poco rentable. En virtud del efecto de fuerza durante el recocido, el núcleo adquirió la forma como la representada en la Fig. 8c. En virtud del campo transversal correspondiente al estado conocido de la técnica, pero también debido al deterioro mecánico por parte de las fuerzas del campo, la permeabilidad era relativamente baja y se encontraba, conforme a la Fig. 7 (*curva* 12), en  $\mu_4 = 140.000$ . Conforme a la Fig. 9a (*curva* 22), este núcleo era ampliamente peor que el estado conocido de la técnica cristalino y se desechó, dado que el ángulo de fase del transformador se convirtió en demasiado grande a lo largo de un amplio intervalo de corriente.

Ejemplo 3: Banda consolidada de manera instantánea de la composición Fe<sub>73,5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>15,5</sub>B<sub>7</sub> se cortó a una anchura de 6 mm, se aisló de forma protectora con MgO y se enrolló, exenta de tensión, para formar un núcleo de banda anular con una relación D<sub>a</sub>/D<sub>i</sub> pequeña de la dimensión 23,3 x 20,8 x 6,2 (factor de carga 80%). Este núcleo de 3,16 g de peso se recoció a continuación en un horno continuo horizontal conforme a la Fig. 3, ascendiendo el tiempo de recocido total a 43 min. Como base se utilizó una placa de cobre de 4 mm de espesor. En tal caso, la temperatura aumentó lentamente de 440°C en la zona de cristalización hasta 568°C en la zona de maduración y se mantuvo allí constante durante 20 min. La permeabilidad del material representado en la Fig. 7, (*curva* 13) se encontraba en  $\mu_4 = 276.000$ . El núcleo se fijó de manera exenta de tensión mediante un revestimiento de resina sintética y se enrolló conforme a la Fig. 4 con un devanado secundario de N<sub>sec</sub> = 2.500 y se conectó conforme a la Fig. 5 con una resistencia de la potencia nominal de 12,5 Ω. El transformador de corriente resultante era bien adecuado para una corriente nominal de 60 A, encontrándose la zona de corriente máxima representable en 129 A, en virtud de la elevada inducción de saturación de B<sub>s</sub> = 1,22 T. Tal como se puede deducir con ayuda de la Fig. 9a (*curva* 23), el error de fase máximo φ se encuentra en 0,17°.

Ejemplo 4: A partir de la misma aleación se enrolló un núcleo con las medidas 47 x 38 x 5 mm. No obstante, el tratamiento térmico se llevó a cabo mediante recocido en la pila en un horno de retorta, llevándose a cabo el tratamiento térmico para la maduración de la estructura y para la compensación de la magnetostricción durante 1 hora a 567°C. No obstante, para evitar un sobrecalentamiento exotérmico entre 440°C y 500°C, se calentó de manera extremadamente lenta con una tasa de 0,1°C/min. Con ello, todo el tratamiento térmico duró aprox. 16 horas y era muy poco rentable. En virtud de presiones mecánicas de la pila de núcleos en el horno de retorta, el núcleo muy inestable mecánicamente adquirió, en virtud de su geometría, la deformación representada en la Fig 8b. La permeabilidad era muy baja en virtud de este deterioro y del efecto magnetostático de la pila y se encontraba conforme a la Fig. 7 (*curva* 14) en  $\mu_4 = 77.000$ . Con ello, este núcleo era peor que el del estado conocido de la técnica cristalino, y se desechó, dado que el error de fase φ conforme a la Fig. 9b (*curva* 24) era demasiado elevado.

Ejemplo 5: Banda consolidada de manera instantánea de la composición Fe<sub>73,5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>14</sub>B<sub>8,5</sub> se cortó a una anchura de 6 mm, se aisló de forma protectora con MgO y se enrolló, exenta de tensión, para formar un núcleo de banda anular con una relación D<sub>a</sub>/D<sub>i</sub> pequeña de la dimensión 23,3 x 20,8 x 6,2 (factor de carga 80%). Este núcleo de 3,16 g de peso se recoció a continuación en un horno continuo horizontal conforme a la Fig. 3, ascendiendo el tiempo de recocido total a 55 min. Como base se utilizó una placa de cobre de 8 mm de espesor. En tal caso, la temperatura ascendió a 462°C en la zona de cristalización y a 556°C en la zona de maduración. La permeabilidad del material representado en la Fig. 7 en la *curva* 15 se encontraba en  $\mu_4 = 303.000$ . El núcleo se encapsuló en la artesa de material sintético, se enrolló conforme a la Fig. 4 con un devanado secundario de N<sub>sec</sub> = 2.500 y se conectó conforme a la Fig. 5 con una resistencia de la potencia nominal de 12,5 Ω. El transformador de corriente resultante era bien adecuado para una corriente nominal de 60 A, encontrándose la zona de corriente máxima representable en 132 A, en virtud de la elevada inducción de saturación de B<sub>s</sub> = 1,22 T. Tal como se puede deducir con ayuda de la Fig. 9b (*curva* 25), el error de fase máximo φ se encuentra en 0,12°.

Ejemplo 6: Banda consolidada de manera instantánea de la composición Fe<sub>73,5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>14</sub>B<sub>8,5</sub> se cortó a una anchura de 6 mm, se aisló de forma protectora con MgO y se enrolló, exenta de tensión, como en los Ejemplos 2 y 4 para formar un núcleo de banda anular con una relación D<sub>a</sub>/D<sub>i</sub> pequeña de la misma dimensión 47 x 38 x 5 (factor de carga 80%). Este núcleo se recoció a continuación en un horno continuo horizontal conforme a la Fig. 3, ascendiendo el tiempo de recocido total a 180 min. Como base se utilizó una placa de cobre de 2 mm de espesor. En tal caso, la temperatura ascendió a 455°C en la zona de cristalización y a 545°C en la zona de maduración, la cual fue recorrida durante 150 minutos. La permeabilidad del material representado en la Fig. 7 como *curva* 16 se encontraba en  $\mu_4 = 160.000$ . Como muestra la Fig. 8a, este núcleo adquirió su forma redonda después del recocido continuo. El núcleo se revistió en el procedimiento de CVD con una delgada capa de material sintético y se enrolló conforme a la Fig. 4 con un devanado secundario de N<sub>sec</sub> = 2.500 y se conectó conforme a la Fig. 5 con una

resistencia de la potencia nominal de 12,5  $\Omega$ . El transformador de corriente resultante era bien adecuado para una corriente nominal de 60 A, encontrándose la zona de corriente máxima representable en 172 A, en virtud de la elevada inducción de saturación de  $B_s = 1,3$  T. Tal como se puede deducir con ayuda de la Fig. 9b (*curva 26*), el error de fase  $\varphi$  se encuentra en como máximo 0,27°.

5

Ejemplo 7: Una banda consolidada de manera instantánea de la composición  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{14}B_{8,5}$  se cortó a una anchura de 6 mm, se aisló de forma protectora con MgO y como en los Ejemplos 2 y 4, se enrolló exenta de tensión para formar un núcleo de banda anular con una relación  $D_a/D_1$  pequeña de la misma dimensión 47 x 38 x 5 (factor de carga 80%). Esta banda se recoció a continuación en un horno continuo horizontal conforme a la Fig. 3. Como base se utilizó una placa de cobre de 6 mm de espesor. En tal caso, la zona de calentamiento total fue recorrida en 5 minutos. La temperatura ajustada ascendió a 590°C. El núcleo conservó la geometría redonda correspondiente a la Fig. 8a. El comportamiento de permeabilidad era equiparable al del Ejemplo 6.

10

El núcleo se fijó mediante impregnación con resina epoxídica y se continuó elaborando para formar un transformador de corriente como en el Ejemplo 6. De manera correspondiente los datos del transformador de corriente eran equiparables a los del Ejemplo 6.

15

## REIVINDICACIONES

1.- Núcleo de transformador de corriente con una relación de diámetro externo del núcleo  $D_a$  a diámetro interno del núcleo  $D_i < 1,25$ , una magnetostricción de saturación  $\lambda_s \leq |4|$  ppm, un bucle de histéresis redondo con  $0,50 \leq Br/Bs \leq 0,85$  y una  $H_{cmáx} \leq 20$  mA/cm, en donde el núcleo de transformador de corriente se compone de una aleación magnética blanda a base de hierro, en la que al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, y la aleación a base de hierro presenta, en esencia, la siguiente composición:



en donde M es un elemento del grupo de V, Nb, W, Ta, Zr, Hf, Ti, Mo o una combinación de estos, y se cumple adicionalmente:

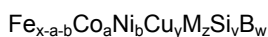
$$x + y + z + v + w = 100\% \text{ con}$$

$$Fe + Co + Ni = x = 100\% - y - z - v - w$$

	Co	$a \leq 1,5$ en %
	Ni	$b \leq 1,5$ en %
20	Cu	$0,5 \leq y \leq 2$ en %
	M	$z \leq 5$ en %
	Si	$6,5 \leq v \leq 18$ en %
	B	$5 \leq w \leq 14$ en %

25 en donde  $v + w > 18$  en %.

2.- Núcleo de transformador de corriente según la reivindicación 1, con una magnetostricción de saturación  $\lambda_s \leq |2|$  ppm, un bucle de histéresis redondo con  $0,50 \leq Br/Bs \leq 0,85$  y una  $H_{cmáx} \leq 10$  mA/cm, en donde el núcleo de transformador de corriente se compone de una aleación magnética blanda a base hierro, en la que al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, y la aleación a base de hierro presenta, en esencia, la siguiente composición:



35 en donde M es un elemento del grupo de V, Nb, W, Ta, Zr, Hf, Ti, Mo o una combinación de estos, y se cumple adicionalmente:

$$x + y + z + v + w = 100\% \text{ con}$$

$$Fe + Co + Ni = x = 100\% - y - z - v - w$$

	Co	$a \leq 0,5$ en %
	Ni	$b \leq 0,5$ en %
	Cu	$0,75 \leq y \leq 1,25$ en %
	M	$2,0 \leq z \leq 3,5$ en %
45	Si	$13 \leq v \leq 16,5$ en %
	B	$5 \leq w \leq 9$ en %

en donde  $20 \leq v + w \leq 25$  en %.

50 3.- Núcleo de transformador de corriente según la reivindicación 2, con una magnetostricción de saturación  $\lambda_s \leq |0,8|$  ppm, un bucle de histéresis redondo con  $0,65 \leq Br/Bs \leq 0,80$  y una  $H_{cmáx} \leq 10$  mA/cm, en donde los núcleos de transformadores de corriente se componen de una aleación magnética blanda a base hierro, en la que al menos el 50% de la estructura de la aleación está ocupada por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, y la aleación a base de hierro presenta, en esencia, la siguiente composición:



en donde M es un elemento del grupo de V, Nb, W, Ta, Zr, Hf, Ti, Mo o una combinación de estos, y se cumple adicionalmente:

$$x + y + z + v + w = 100\% \text{ con}$$

$$Fe + Co + Ni = x = 100\% - y - z - v - w$$

## ES 2 387 310 T3

Co	$a \leq 0,5$ en %
Ni	$b \leq 0,5$ en %
Cu	$0,75 \leq y \leq 1,25$ en %
M	$2,0 \leq z \leq 3,5$ en %
Si	$13 \leq v \leq 16,5$ en %
B	$5 \leq w \leq 9$ en %

5

en donde  $20 \leq v + w \leq 25$  en %.

10

4.- Núcleo de transformador de corriente según una de las reivindicaciones 1 a 3, con una  $\mu_4 > 90.000$ .

5.- Núcleo de transformador de corriente según una de las reivindicaciones 1 a 3, con una  $\mu_{\text{máx}} > 350.000$ .

15

6.- Núcleo de transformador de corriente según una de las reivindicaciones 1 a 3, con una inducción de saturación  $B_s \leq 1,4$  Tesla,

20

7.- Núcleo de transformador de corriente según la reivindicación 6, con una inducción de saturación  $B_s$  de 1,1 a 1,4 Tesla.

8.- Núcleo de transformador de corriente según una de las reivindicaciones 1 a 3, para un transformador de corriente con un error de fase  $< 1^\circ$ .

25

9.- Núcleo de transformador de corriente según una de las reivindicaciones 1 a 3, con una anisotropía total magnética correspondiente a  $K_{\text{ges}} < 2 \text{ J/m}^3$ .

30

10.- Transformador de corriente con un núcleo de transformador de corriente según una de las reivindicaciones 1 a 3, en donde el núcleo de transformador de corriente está configurado como núcleo de banda anular con al menos un devanado primario y al menos un devanado secundario.

35

11.- Procedimiento para la producción de núcleos de transformadores de corriente en forma de anillo a base de una aleación magnética blanda a base de hierro, en donde al menos el 50% del volumen de la estructura de la aleación está ocupado por partículas finamente cristalinas con un tamaño medio de partículas de 100 nm o menor, con las siguientes etapas:

40

- habilitar una masa fundida de la aleación;
- producir una banda de aleación amorfa a partir de la masa fundida de la aleación por medio de tecnología de consolidación instantánea;
- arrollamiento exento de tensión de la banda amorfa para formar núcleos de transformadores de corriente amorfos;
- tratamiento térmico de los núcleos de transformadores de corriente amorfos no apilados en continuo para formar núcleos de transformadores de corriente nanocristalinos bajo exclusión amplísima de la influencia de campos magnéticos,

45

produciendo los núcleos de transformadores de corriente en forma de anillo con una relación de diámetro externo del núcleo  $D_a$  a diámetro interno del núcleo  $D_i < 1,25$  y realizándose el tratamiento térmico en un intervalo de temperaturas de aprox. 440°C hasta aprox. 620°C, caracterizado porque en el caso del tratamiento térmico en el intervalo de temperaturas de 440°C hasta 620°C existe una primera fase de calentamiento y una segunda fase de calentamiento, cuya tasa de calentamiento es menor que la de la primera fase de calentamiento.

50

12.- Procedimiento según la reivindicación 11, en el que el tratamiento térmico se lleva a cabo en una atmósfera de gas inerte.

55

13.- Procedimiento según la reivindicación 11, en el que el tratamiento térmico se lleva a cabo en una atmósfera de gas reductor.

60

14.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 11 a 13, en el que la banda amorfa se reviste de forma eléctricamente aislante antes del arrollamiento.

15.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 11 a 14, en el que el núcleo del transformador de corriente se sumerge después del arrollamiento en un medio de aislamiento.

## ES 2 387 310 T3

- 16.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 11 a 15, en el que el tratamiento térmico de los núcleos de transformadores de corriente amorfos no apilados tiene lugar en disipadores de calor que presentan una elevada capacidad térmica y una elevada conductividad térmica.
- 5 17.- Procedimiento según la reivindicación 16, en el que como material para los disipadores de calor está previsto un metal o una aleación metálica, un polvo de metal o un material cerámico.
- 18.- Procedimiento según la reivindicación 17, en el que como metal o como polvo de metal está previsto cobre, plata o un acero conductor del calor.
- 10 19.- Procedimiento según la reivindicación 17, en el que como material para los disipadores de calor está previsto un polvo cerámico.
- 15 20.- Procedimiento según la reivindicación 17 ó 19, en el que como material cerámico o polvo cerámico está previsto óxido de magnesio, óxido de aluminio o nitruro de aluminio.
- 21.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 13 a 16, en el que la duración de permanencia en la totalidad de las zonas de recocido oscila entre 5 y 180 minutos.



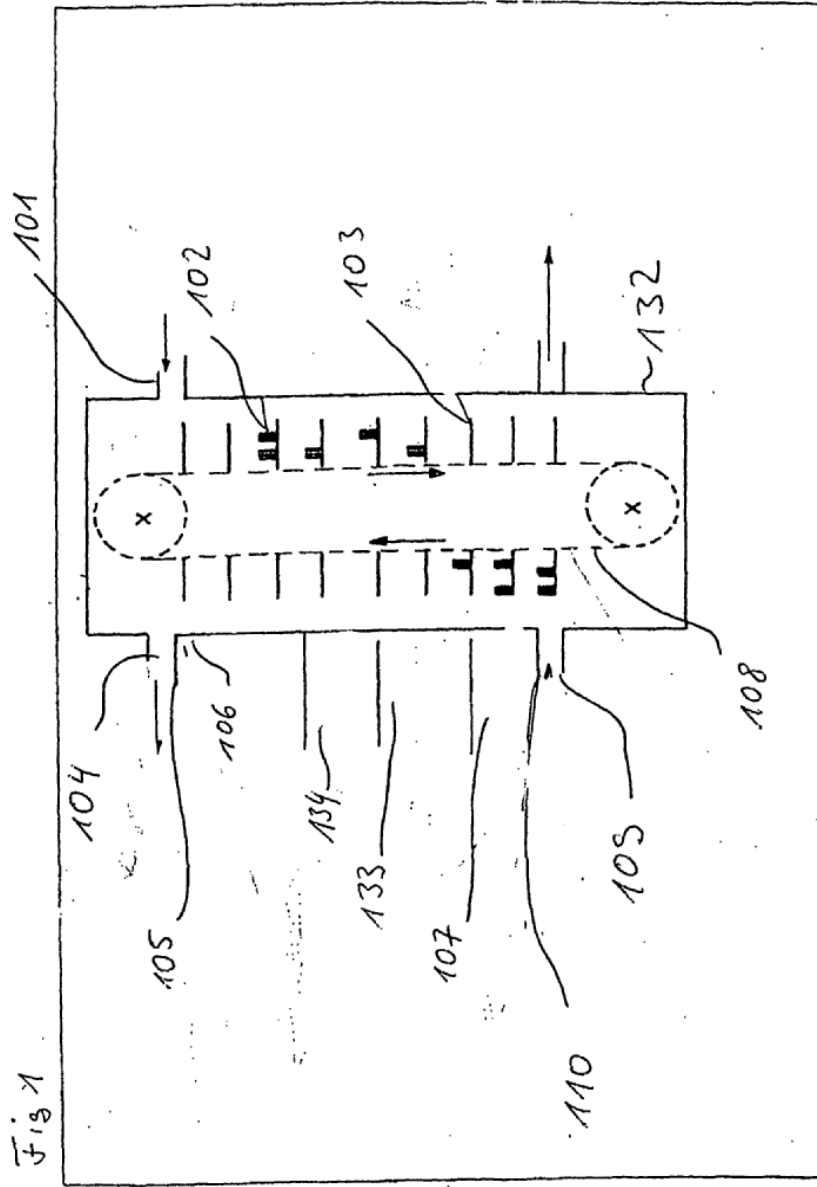
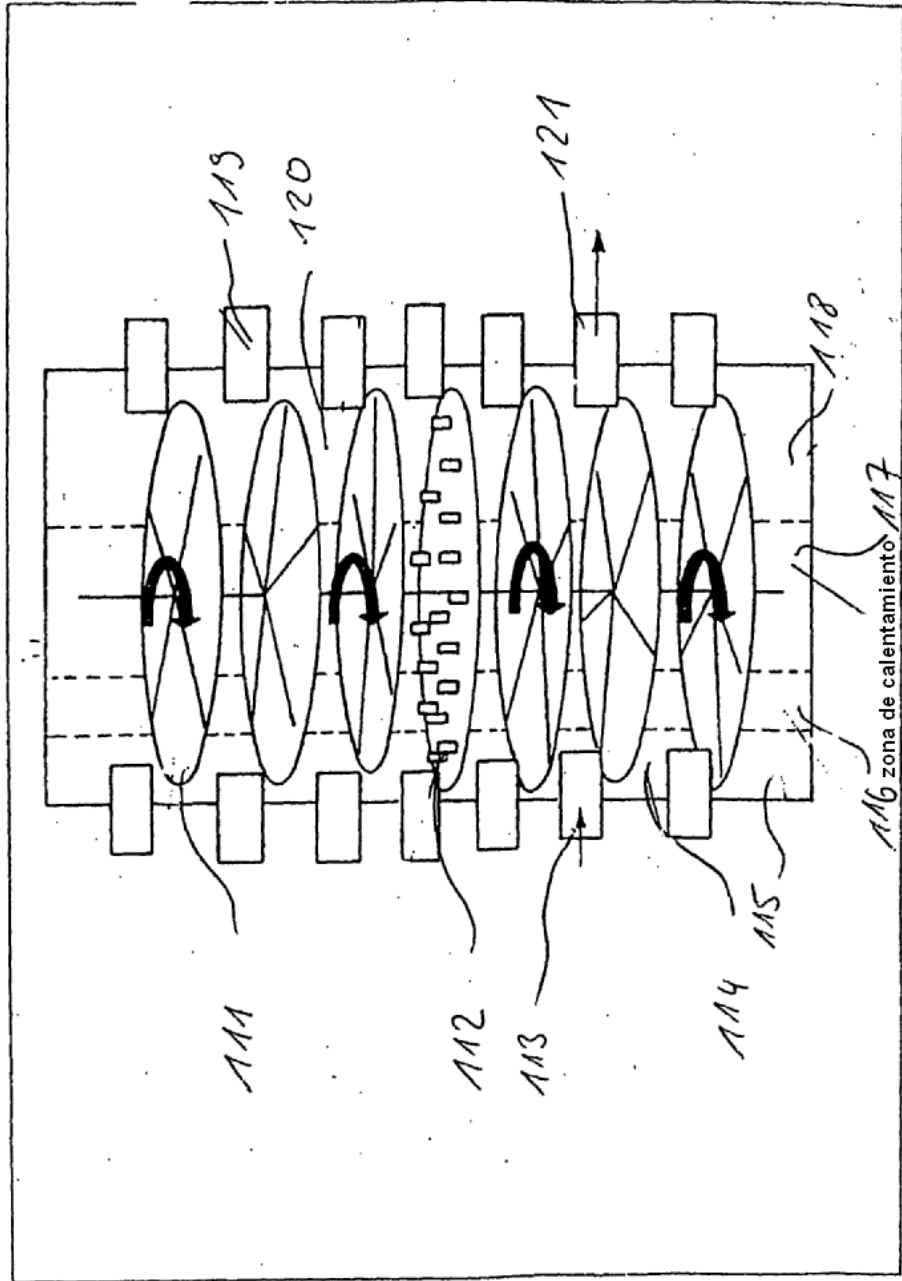
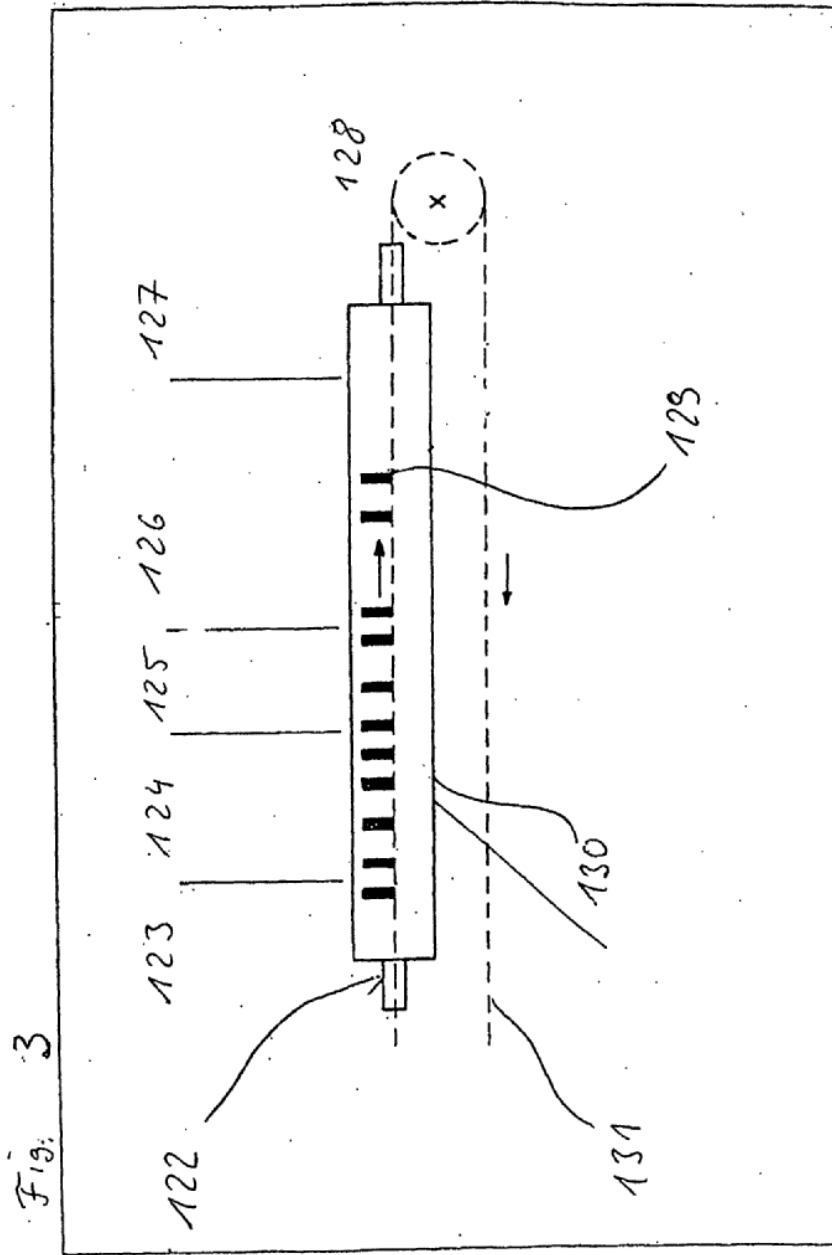


Fig 2





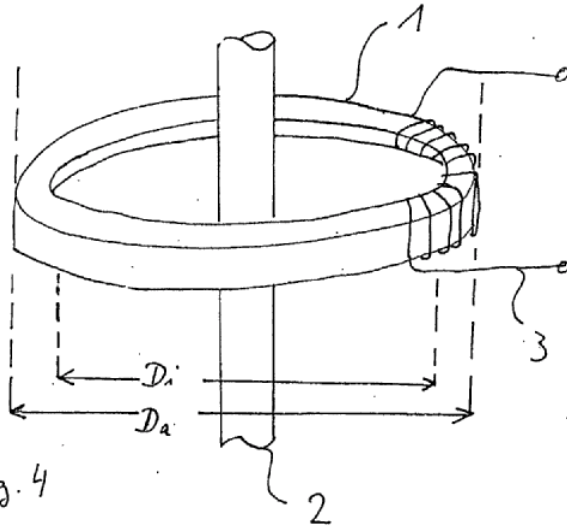


Fig. 4

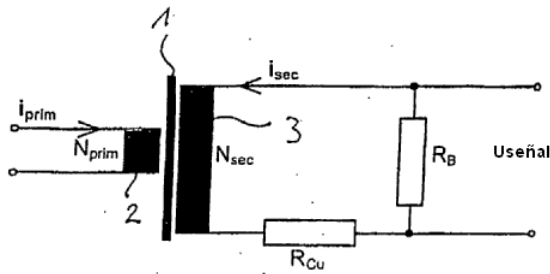


Fig. 5

$N_{prim} : 1 \dots 6$   
 $I_{prim} : 5 A_{eff} \dots 120 A_{eff} (max.)$   
 $N_{sec} : 500 \dots 4000$   
 $I_{sec} \approx - I_{prim} \cdot N_{prim} / N_{sec}$   
 $R_B : 1 \Omega \dots 200 \Omega (potencia\ nominal)$   
 $R_{Cu} : 1 \Omega \dots 200 \Omega (devanado)$   
 $Useñal : 300 mV_{eff} (max.)$   
 $Frecuencia : 50 / 60\ Hz$

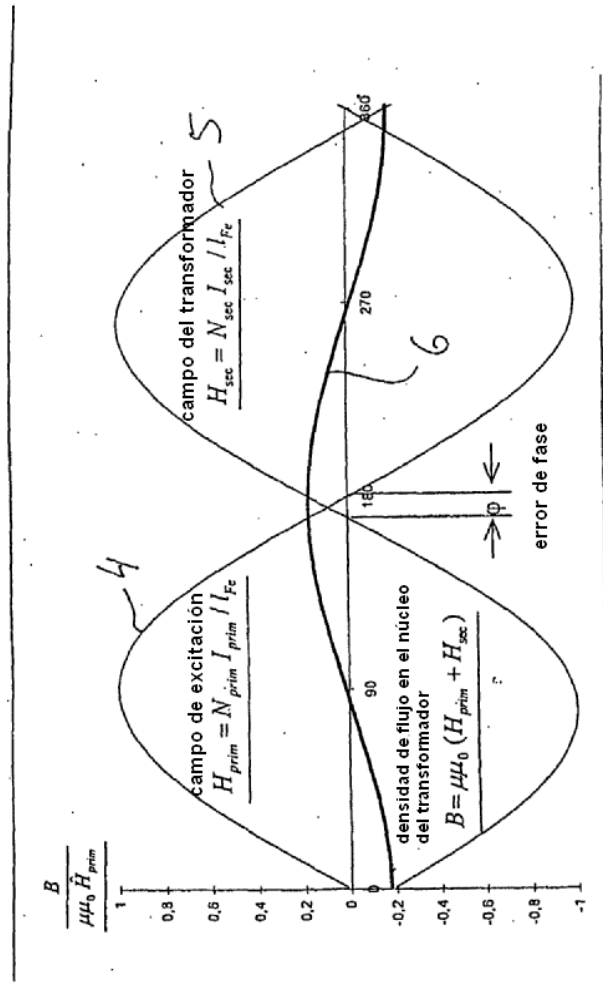


Fig. 6

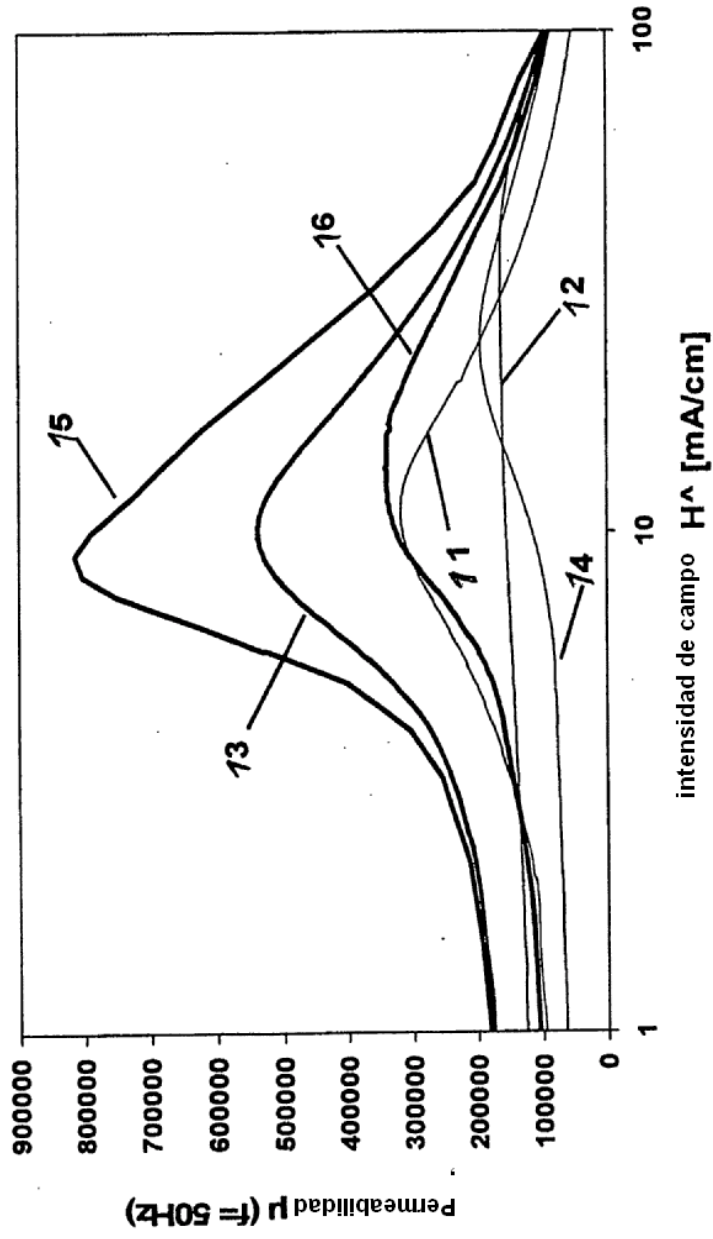


Fig. 7

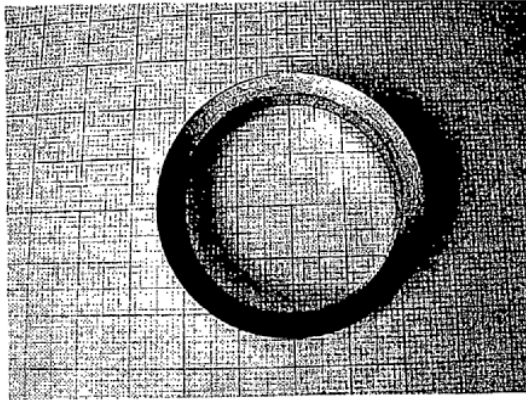


Fig. 8 a

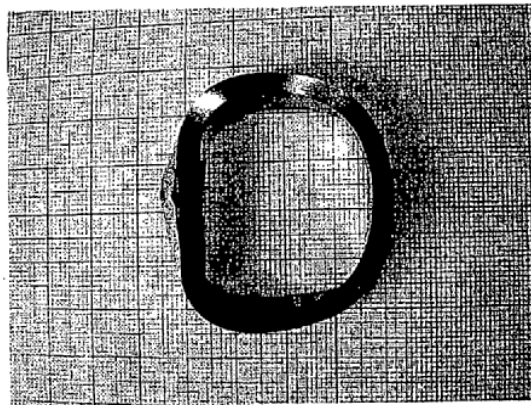


Fig. 8 b

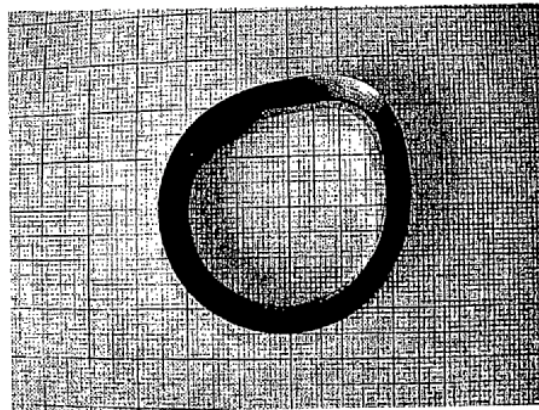


Fig. 8 c

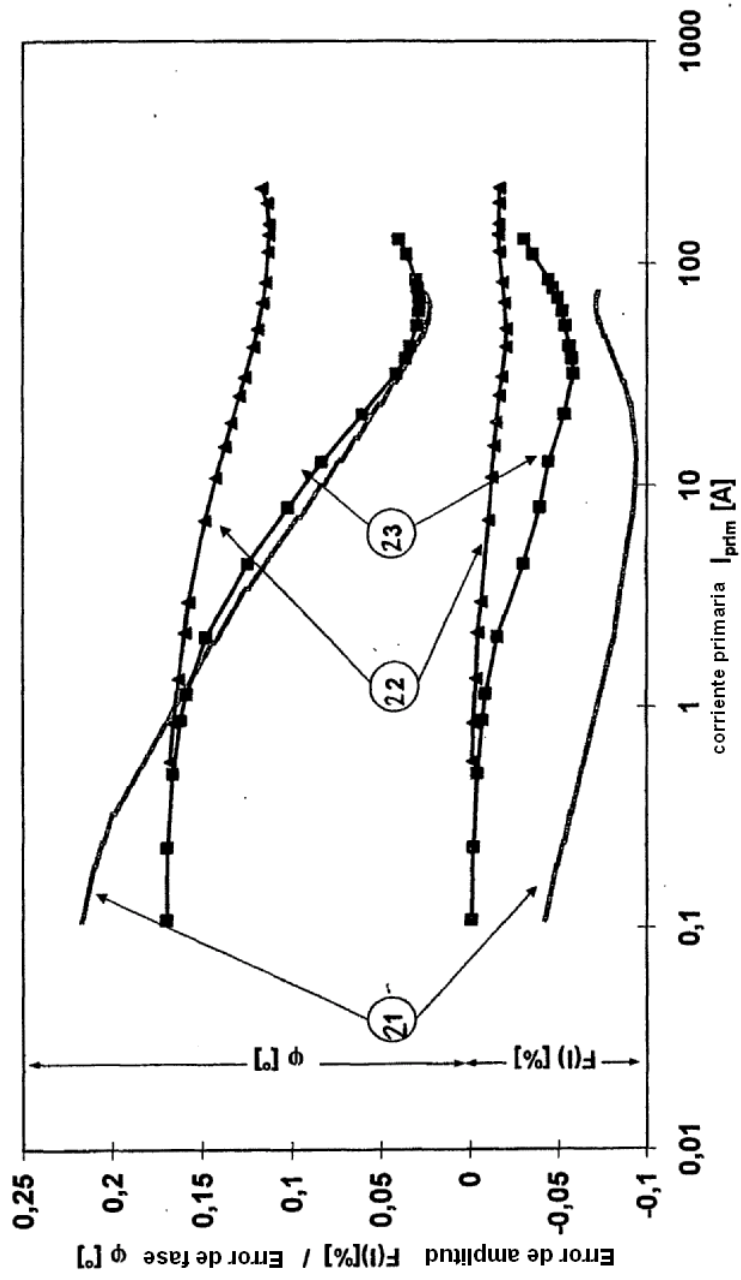


Fig. 9a



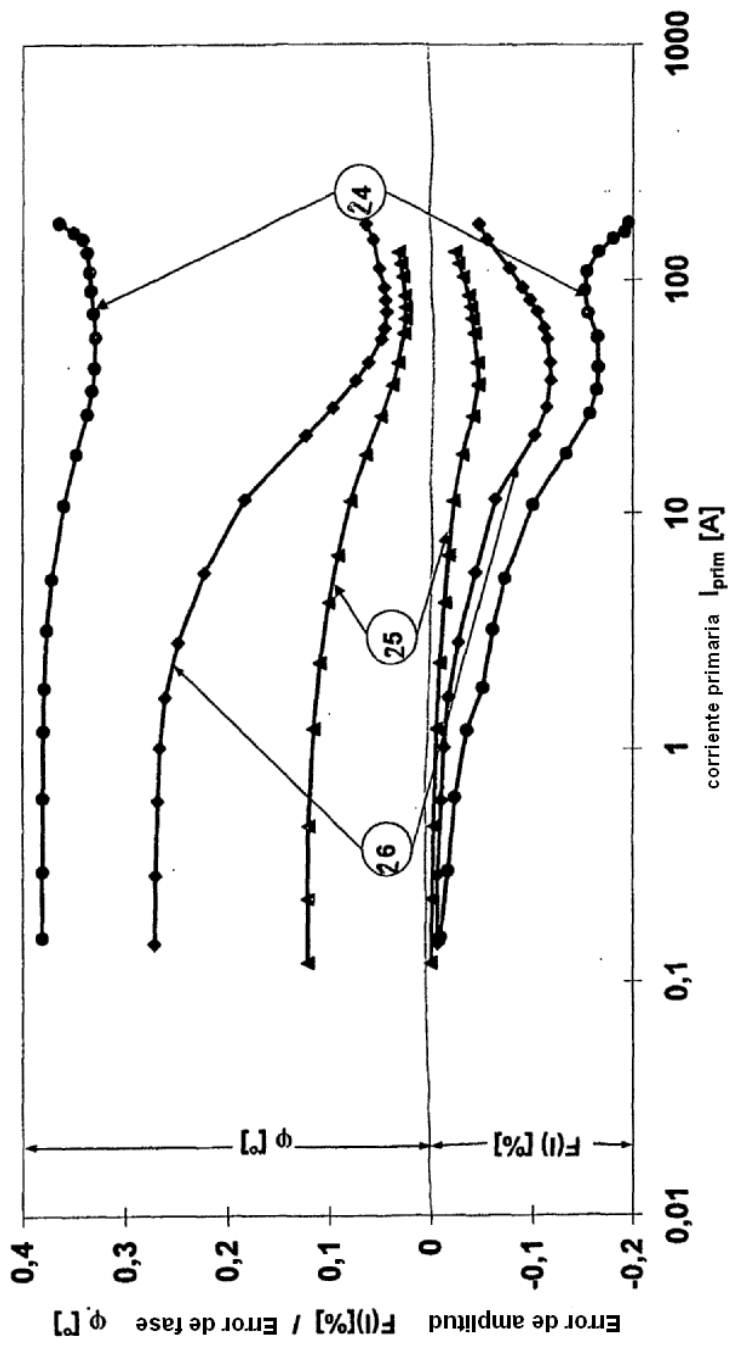


Fig. 9b