

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 542 019**

51 Int. Cl.:

**H01F 1/14** (2006.01)

**C22C 38/00** (2006.01)

**H01F 38/28** (2006.01)

**H01F 1/153** (2006.01)

**H01F 41/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.12.2005 E 05816635 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.06.2015 EP 1840906**

54 Título: **Núcleo magnético para transformador de corriente, transformador de corriente y vatihorímetro**

30 Prioridad:

**17.12.2004 JP 2004365957**

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

**29.07.2015**

73 Titular/es:

**HITACHI METALS, LTD. (100.0%)  
2-1, SHIBAURA 1-CHOME  
MINATO-KU, TOKYO 105-8614, JP**

72 Inventor/es:

**YOSHIZAWA, YOSHIHITO y  
NAOE, MASAMU**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

**ES 2 542 019 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 magnético para transformador de corriente, transformador de corriente y vatímetro.

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un núcleo de transformador de corriente adecuado para detectar corriente alterna de forma de onda asimétrica tal como corriente alterna, sinusoidal, de semionda, etc. y corriente alterna superpuesta a corriente continua, y a un transformador de corriente y a un medidor de potencia que utilizan tal núcleo.

10

**Antecedentes de la invención**

Los medidores de potencia utilizados para detectar el consumo de potencia de electrodomésticos e instalaciones en hogares y en la industria se clasifican en medidores de potencia de tipo inducción y medidores de potencia electrónicos. Aunque los medidores de potencia de tipo inducción que comprenden discos giratorios fueron los predominantes de manera convencional, los medidores de potencia electrónicos están encontrando recientemente una utilización más amplia debido al desarrollo de la electrónica. Los medidores de potencia adaptados a reglas convencionales tales como la regla IEC62053-22, etc. no pueden llevar a cabo la detección precisa de corriente con forma de onda distorsionada tal como corriente alterna, sinusoidal, de semionda, etc., no logrando medir la potencia de manera precisa. Por consiguiente, en Europa se aprobó la regla IEC62053-21, una regla de medidores de potencia adaptada para formas de onda distorsionadas (formas de onda de semionda rectificadas). En otros países distintos a los de Europa, también se descartaron los medidores de potencia tales como los presentes medidores de discos giratorios, etc. que no logran medir de manera precisa la potencia de formas de onda distorsionadas, y se ha estado poniendo en uso real medidores de potencia adaptados a la regla IEC62053-21, que utilizan transformadores de corriente (CT) o elementos de efecto Hall para la detección de corriente. En los campos industriales tales como inversores, etc., los transformadores de corriente también desempeñan un papel importante en la detección de corriente alterna de forma de onda distorsionada y corriente alterna superpuesta a corriente continua.

Un sensor de corriente que utiliza un elemento de efecto Hall comprende un elemento de efecto Hall dispuesto en un entrehierro de un núcleo magnético, y un hilo conductor para dejar fluir la corriente que ha de medirse, que penetra a través de un circuito magnético cerrado del núcleo magnético, para detectar un campo magnético generado en el entrehierro, que es sustancialmente proporcional a la corriente, mediante el elemento de efecto Hall, detectando de ese modo la corriente.

El transformador de corriente (CT) comprende habitualmente un núcleo magnético que presenta un circuito magnético cerrado, un devanado primario para dejar fluir la corriente que ha de medirse, que penetra a través del circuito magnético cerrado, y un devanado secundario en un número de vueltas relativamente grande. La figura 8 muestra la estructura de un sensor de corriente de tipo de transformador de corriente (CT). El núcleo magnético presenta una forma de tipo anillo o de tipo de núcleo ensamblado, y un núcleo toroidal de tipo anillo con devanados puede hacerse más pequeño con una fuga de flujo magnético reducida, permitiendo de ese modo un rendimiento cercano al funcionamiento teórico.

La corriente de salida ideal  $i$  obtenida a partir de la corriente de paso alterna  $I_0$  en la condición de  $R_L \ll 2\pi f \cdot L_2$  es  $I_0/N$ , en la que  $N$  es el número de un devanado secundario, y la tensión de salida  $E_0$  es  $I_0 \cdot R_L/N$ , en la que  $R_L$  es la resistencia de la carga. La tensión de salida  $E_0$  es realmente menor que el valor ideal debido a una pérdida en el núcleo, una fuga de flujo magnético, etc. La sensibilidad del transformador de corriente corresponde a  $E_0/I_0$ , pero este valor se determina realmente mediante un coeficiente de acoplamiento de devanados primario y secundario. Se cumple  $E_0 = I_0 \cdot R_L \cdot K/N$ , en la que  $K$  es un coeficiente de acoplamiento.

Aunque el coeficiente de acoplamiento  $K$  es 1 en un transformador de corriente ideal,  $K$  es de aproximadamente 0,95-0,99 en transformadores de corriente reales a una  $R_L$  de 100  $\Omega$  o menos, bajo la influencia de la resistencia interna de los devanados, la resistencia de la carga, una fuga de flujo magnético, la no linealidad de una permeabilidad, etc. Debido a que el valor de  $K$  es bajo, si existe un entrehierro en un circuito magnético, un núcleo toroidal sin entrehierro puede proporcionar un transformador de corriente ideal que presenta el mayor grado de acoplamiento. Una mayor área de sección transversal  $S$ , un mayor número  $N$  de un devanado secundario y una resistencia de carga  $R_L$  menor proporcionan un valor de  $K$  más próximo a 1. Este valor de  $K$  también varía dependiendo de la corriente de paso  $I_0$ . En el caso de una microcorriente  $I_0$  de 100 mA o menos, el valor de  $K$  tiende a ser bajo. Particularmente cuando se utiliza un material de baja permeabilidad para el núcleo magnético, esta tendencia es grande. Por consiguiente, cuando la microcorriente debe medirse con una alta precisión, se utiliza un material de alta permeabilidad para el núcleo magnético.

Un error de relación es un error relativo del valor medido con respecto al valor ideal en cada punto de medición, que indica cómo de precisa es la corriente medida. El coeficiente de acoplamiento está correlacionado con el error de relación. Una diferencia de fase representa la precisión de una forma de onda, que indica la desviación de fase de la forma de onda de salida a partir de la forma de onda original. La salida del transformador de corriente presenta

65

habitualmente una fase en adelanto. Estas dos características son particularmente importantes para los transformadores de corriente utilizados para medidores de potencia de integración, etc.

En el transformador de corriente que debe medir microcorriente, se utilizan generalmente materiales que presentan una alta permeabilidad inicial tales como Parmalloy, etc. para disponer de un alto coeficiente de acoplamiento  $K$ , y un pequeño error de relación y diferencia de fase. La corriente de paso máxima  $I_{0max}$  del transformador de corriente se define como la corriente máxima con linealidad asegurada, que se ve afectada por la resistencia de la carga, la resistencia interna, y las propiedades magnéticas de los materiales de núcleo utilizados. Para permitir la medición de una corriente grande, los materiales de núcleo presentan preferiblemente una densidad de flujo magnético de saturación lo más alta posible.

Los materiales conocidos utilizados para los núcleos de transformadores de corriente incluyen acero al silicio, Parmalloy, aleaciones amorfas, aleaciones nanocristalinas, a base de Fe, etc. Debido a que las láminas de acero al silicio de alta densidad de flujo magnético, poco costosas, presentan una baja permeabilidad, gran histéresis, y mala linealidad de lazo de magnetización, presentan una diferencia de fase y error de relación ampliamente variable, dando como resultado una dificultad a la hora de proporcionar transformadores de corriente de alta precisión. Además, al presentar una densidad de flujo magnético residual grande, no pueden llevar a cabo fácilmente la medición precisa de corriente asimétrica tal como corriente sinusoidal, de semionda, etc.

Las aleaciones amorfas a base de Fe presentan grandes variaciones de un error de relación y una diferencia de fase cuando se utilizan para el transformador de corriente. El documento JP 2002-525863 A da a conocer que, debido a que una aleación amorfa a base de Co sometida a tratamiento térmico en un campo magnético presenta una buena linealidad de la curva de magnetización y pequeña histéresis, presenta características excelentes cuando se utiliza para un transformador de corriente (CT) para detectar corriente de forma de onda asimétrica. Se utilizan aleaciones amorfas a base de Co que presentan una baja permeabilidad de tan sólo aproximadamente 1500 y una buena linealidad de la curva de magnetización para transformadores de corriente (CT) para detección de corriente, que están adaptadas a la regla IEC62053-21 anterior, una regla de medidores de potencia. Sin embargo, las densidades de flujo magnético de saturación de las aleaciones amorfas a base de Co son insuficientemente bajas de tan sólo 1,2 T o menos, y son térmicamente inestables. Por tanto, existen los siguientes problemas: la medición está limitada cuando se polariza con una corriente grande; no presentan necesariamente una reducción de tamaño y una estabilidad suficientes; y debido a que su permeabilidad no puede aumentarse tanto con respecto al aspecto de la saturación magnética en vista de la superposición de corriente continua, presentan una diferencia de fase y error de relación grande, características importantes para los transformadores de corriente. Además, las aleaciones amorfas a base de Co no son ventajosas en cuanto a costes debido a que contienen una gran cantidad de Co, que es costoso.

Los materiales que presentan permeabilidad relativamente alta tales como Parmalloy, etc. se utilizan para núcleos de transformadores de corriente en medidores de potencia de integración adaptados a las reglas convencionales IEC62053-22, etc. Tales materiales de alta permeabilidad pueden medir la potencia de forma de onda de corriente y tensión con simetría positiva-negativa, pero no pueden medir de manera precisa la potencia de corriente de forma de onda asimétrica y corriente con forma de onda distorsionada.

Las aleaciones nanocristalinas, a base de Fe que presentan una permeabilidad alta y propiedades magnéticas dulces excelentes se utilizan para núcleos magnéticos de bobinas de choque en modo común, transformadores de alta frecuencia, transformadores de pulso, etc. Las composiciones típicas de las aleaciones nanocristalinas, a base de Fe son Fe-Cu-(Nb, Ti, Zr, Hf, Mo, W, Ta)-Si-B, Fe-Cu-(Nb, Ti, Zr, Hf, Mo, W, Ta)-B, etc. descritas en el documento JP 4-4393 B y el documento JP 1-242755 A. Estas aleaciones nanocristalinas, a base de Fe se producen habitualmente formando aleaciones amorfas a partir de una fase de líquido o gas mediante enfriamiento brusco, y sometiéndolas a tratamiento térmico para su microcristalización. Se conoce que las aleaciones nanocristalinas, a base de Fe presentan una densidad de flujo magnético de saturación tan alta, y una magnetostricción tan baja, como las de las aleaciones amorfas a base de Fe, lo que conlleva propiedades magnéticas dulces excelentes. Los documentos JP 1-235213 A, JP 5-203679 A y JP 2002-530854 A describen que los materiales nanocristalinos a base de Fe son adecuados para sensores de corriente (transformadores de corriente) utilizados en disyuntors de fuga, medidores de potencia de integración, etc.

Sin embargo, los núcleos de transformadores de corriente compuestos por materiales de alta permeabilidad tales como Parmalloy convencional y aleaciones magnéticas dulces, nanocristalinas, a base de Fe no logran detectar suficientemente la corriente debido a saturación magnética, particularmente en el caso de polarización de corriente continua. Los núcleos de las aleaciones magnéticas dulces, nanocristalinas, a base de Fe que presentan densidad de flujo magnético de saturación y permeabilidad altas son adecuados para transformadores de corriente tales como disyuntors de fuga, etc., pero presentan una  $H_K$  tan pequeña que no pueden medir fácilmente la corriente en el caso de polarización de corriente continua debido a su saturación magnética. En el caso de un transformador de corriente utilizado para corriente sinusoidal, de semionda, se superpone una corriente continua de  $I_{m\acute{a}x}/2\pi$ , donde  $I_{m\acute{a}x}$  es un valor de pico de la corriente sinusoidal, de semionda. Por consiguiente, los núcleos de transformadores de corriente compuestos por las aleaciones magnéticas dulces, nanocristalinas, a base de Fe convencionales descritas en el documento JP2002-530854 A, etc., que presentan una permeabilidad alta de hasta 12000 o más, están

magnéticamente saturados debido a la polarización de campo magnético de corriente continua. Por tanto, no son adecuados para la medición de tal corriente de forma de onda asimétrica.

5 Por tanto, ha incrementado la demanda de un material magnético que haga posible medir de manera precisa la potencia de corriente de forma de onda asimétrica. Incluso cuando se superponen corriente de forma de onda asimétrica tal como corriente sinusoidal, de semionda, y corriente continua, se exige una medición precisa de la corriente alterna. Para satisfacer tal demanda es necesario un núcleo de transformador de corriente compuesto por un material magnético que presente una densidad de flujo magnético residual baja, pequeña histéresis, y buena linealidad de la curva de magnetización, que no sea fácilmente saturable y genere un campo magnético anisotrópico  $H_K$  relativamente grande.

10 El documento EP 1 045 402 A2 da a conocer un ejemplo para una aleación que presenta una composición en línea con el preámbulo de la presente reivindicación 1.

### 15 **Objetivos de la invención**

Por consiguiente, un objetivo de la presente invención es proporcionar un núcleo de transformador de corriente que pueda medir de manera precisa la potencia de corriente de forma de onda asimétrica y corriente de forma de onda distorsionada.

20 Otro objetivo de la presente invención es proporcionar un núcleo de transformador de corriente pequeño, poco costoso, térmicamente estable con un amplio intervalo de medición de corriente.

25 Un objetivo adicional de la presente invención es proporcionar un transformador de corriente y un medidor de potencia que utilicen tal núcleo magnético.

### **Divulgación de la invención**

30 Como resultado de una intensa investigación en vista de los objetivos anteriores, los inventores han descubierto que (a) una aleación nanocrystalina a base de Fe que contiene cantidades aumentadas de Co y/o Ni, componiéndose al menos parte o la totalidad de su estructura por granos de cristal que presentan un tamaño de partícula promedio de 50 nm o menos, presenta una densidad de flujo magnético  $B_{8000}$  de 1,2 T o más a  $8000 \text{ Am}^{-1}$ , un campo magnético anisotrópico  $H_K$  de  $150\text{-}1500 \text{ Am}^{-1}$ , una relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$  del 5% o menos, y una permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  de  $800\text{-}7000$  a 50 Hz y  $0,05 \text{ Am}^{-1}$ , y que (b) un núcleo compuesto por esta aleación presenta características excelentes cuando se utiliza para un transformador de corriente para detectar corriente de forma de onda asimétrica y corriente polarizada por corriente continua. La presente invención se ha completado basándose en tales hallazgos.

40 El núcleo de transformador de corriente de la presente invención se define en la reivindicación 1. Las reivindicaciones dependientes se refieren a realizaciones preferidas.

El medidor de potencia de la presente invención multiplica el valor de la corriente obtenido por el transformador de corriente anterior y la tensión en ese momento para calcular la potencia utilizada.

### 45 **Breve descripción de los dibujos**

La figura 1 es un gráfico que muestra la densidad de flujo magnético  $B_{8000}$  de una aleación de  $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$  (en % atómico) a  $8000 \text{ Am}^{-1}$ , que se utiliza para el núcleo magnético de la presente invención para un transformador de corriente.

50 La figura 2 es un gráfico que muestra la relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$  de una aleación de  $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$  (en % atómico), que se utiliza para el núcleo magnético de la presente invención para un transformador de corriente.

55 La figura 3 es un gráfico que muestra la coercitividad  $H_c$  de una aleación de  $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$  (en % atómico), que se utiliza para el núcleo magnético de la presente invención para un transformador de corriente.

La figura 4 es un gráfico que muestra la permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  de una aleación de  $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$  (en % atómico) a 50 Hz y  $0,05 \text{ Am}^{-1}$ , que se utiliza para el núcleo magnético de la presente invención para un transformador de corriente.

60 La figura 5 es un gráfico que muestra el campo magnético anisotrópico  $H_K$  de una aleación de  $\text{Fe}_{83-x}\text{Co}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_7\text{Si}_1\text{B}_8$  (en % atómico), que se utiliza para el núcleo magnético de la presente invención para un transformador de corriente.

65 La figura 6 es un gráfico que muestra los lazos B-H de corriente continua de un núcleo magnético de una aleación de  $\text{Fe}_{53,8}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{0,7}\text{Nb}_{2,6}\text{Si}_9\text{B}_9$  (en % atómico) utilizada en el transformador de corriente de la presente invención y un núcleo magnético de una aleación amorfa a base de Co convencional.

La figura 7 es un gráfico que muestra la dependencia de la permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu$ , a 50 Hz de un núcleo magnético de una aleación de  $\text{Fe}_{53,8}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{0,7}\text{Nb}_{2,6}\text{Si}_9\text{B}_9$  (en % atómico) utilizada en el transformador de corriente de la presente invención sobre un campo magnético.

La figura 8 es una vista en perspectiva que muestra un ejemplo del sensor de corriente de tipo de transformador de corriente (CT) de la presente invención.

La figura 9 es un gráfico que muestra un campo magnético anisotrópico  $H_K$  en un lazo B-H en el eje de magnetización difícil del núcleo de transformador de corriente.

### Descripción del mejor modo de la invención

[1] Aleación nanocrystalina a base de Fe

(1) Composición

La aleación nanocrystalina a base de Fe para el núcleo de transformador de corriente de la presente invención presenta una composición representada por la fórmula general:  $\text{Fe}_{100-x-a-y-c}\text{M}_x\text{Cu}_a\text{M}'_y\text{X}'_c$  (en % atómico), en la que M es Co y/o Ni, M' es al menos un elemento seleccionado del grupo que consiste en V, Ti, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta y W, X' es Si y/o B, y x, a, y y c son números que satisfacen  $15 \leq x \leq 40$ ,  $0,1 \leq a \leq 3$ ,  $1 \leq y \leq 10$ ,  $2 \leq c \leq 30$ , y  $7 \leq y + c \leq 31$ , respectivamente.

M es Co y/o Ni, que presenta funciones de aumento de anisotropía magnética inducida, mejora la linealidad de un lazo B-H, ajusta un campo magnético anisotrópico  $H_K$ , y permite el funcionamiento como transformador de corriente incluso con corriente continua polarizada en casos en los que se mide corriente alterna, sinusoidal, de semionda, etc., y otros. El contenido de M, x, debe cumplir generalmente  $10 \leq x \leq 50$ . Cuando x es menor que el 10% atómico,  $H_K$  es tan pequeño que el núcleo magnético se satura cuando se superpone corriente continua, dando como resultado una dificultad en la medición de corriente. Cuando x supera el 50% atómico,  $H_K$  pasa a ser tan grande que da como resultado demasiado aumento de los valores absolutos de una diferencia de fase y un error de relación. El contenido de M, x, de la presente invención cumple  $15 \leq x \leq 40$ , preferiblemente  $18 \leq x \leq 37$ , lo más preferiblemente  $22 \leq x \leq 35$ . La x en un intervalo de 10-50 proporciona un transformador de corriente bien equilibrado, de alta precisión, porque puede llevarse a cabo una medición de corriente precisa incluso cuando se superpone una corriente continua.

El contenido de Cu, a, cumple  $0,1 \leq a \leq 3$ . Cuando a es menor que el 0,1% atómico, existe una diferencia de fase grande. Cuando a supera el 3% atómico, el material del núcleo se vuelve quebradizo, dando como resultado una dificultad para formar el núcleo magnético. El contenido de Cu, a, preferiblemente cumple  $0,3 \leq a \leq 2$ .

M' es un elemento para acelerar la formación de una fase amorfa. M' es al menos un elemento seleccionado del grupo que consiste en V, Ti, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta y W, y su cantidad y está en el intervalo de  $1 \leq y \leq 10$ . Cuando y es menor que el 1% atómico, no puede obtenerse una estructura de grano de cristal fino tras el tratamiento térmico, dando como resultado un aumento de los valores absolutos de una diferencia de fase y un error de relación. Cuando y supera el 10% atómico,  $H_K$  disminuye debido a una disminución drástica de una densidad de flujo magnético de saturación, dando como resultado una dificultad para la medición de corriente por saturación magnética en el caso de polarización de corriente continua. El contenido de M', y, preferido cumple  $1,5 \leq y \leq 9$ .

X' es también un elemento para acelerar la formación de una fase amorfa. X' es Si y/o B, y su cantidad c está en el intervalo de  $2 \leq c \leq 30$ . Cuando el contenido de X', c, es menor que el 2% atómico, los valores absolutos de una diferencia de fase y un error de relación aumentan. Cuando supera el 30% atómico,  $H_K$  disminuye debido a una disminución drástica en una densidad de flujo magnético de saturación, dando como resultado una dificultad para la medición de corriente por saturación magnética en el caso de polarización de corriente continua. El contenido de X', c, cumple preferiblemente  $5 \leq c \leq 25$ , más preferiblemente  $7 \leq c \leq 24$ .

La suma del contenido de M', y, y el contenido de X', c, cumple la condición de  $7 \leq y + c \leq 31$ . Cuando y + c es menor que el 7% atómico, la diferencia de fase es extremadamente grande. Cuando supera el 31% atómico, la densidad de flujo magnético de saturación disminuye. y + c cumple preferiblemente  $10 \leq y + c \leq 28$ , más preferiblemente  $13 \leq y + c \leq 27$ .

Particularmente cuando el contenido de B es del 4-12% atómico, se obtiene preferiblemente un núcleo de transformador de corriente con una diferencia de fase pequeña. El contenido de B es particularmente del 7-10% atómico. Cuando el contenido de Si es del 0,5-17% atómico, los valores absolutos de una diferencia de fase y un error de relación son tan pequeños que puede llevarse a cabo una medición de corriente de alta precisión incluso cuando se polariza con corriente sinusoidal de semionda o continua durante la medición de la corriente alterna. El contenido de Si es particularmente del 0,7-5% atómico.

Para ajustar la resistencia a la corrosión, la diferencia de fase y el error de relación de la aleación, parte de M' puede sustituirse por al menos un elemento seleccionado del grupo que consiste en Cr, Mn, Sn, Zn, In, Ag, Au, Sc, elementos del grupo del platino, Mg, Ca, Sr, Ba, Y, elementos de las tierras raras, N, O y S, y para ajustar la diferencia de fase y el error de relación, parte de X' puede sustituirse por al menos un elemento seleccionado del grupo que consiste en C, Ge, Ga, Al, Be y P.

## (2) Método de producción

El núcleo de transformador de corriente de la presente invención se produce mediante enfriamiento brusco de una masa fundida de aleación que presenta dicha composición mediante un método de enfriamiento brusco tal como un método de un solo rodillo, etc. para formar una cinta de aleación amorfa delgada, cortando longitudinalmente la cinta si fuera necesario, enrollándola alrededor de un núcleo toroidal, tratando térmicamente el núcleo toroidal a una temperatura de cristalización o mayor para formar finos cristales que presentan un tamaño de partícula promedio de 50 nm o menos. Aunque la cinta de aleación amorfa delgada antes del tratamiento térmico preferiblemente no contiene una fase cristalina, puede contener parcialmente una fase cristalina. Aunque el método de enfriamiento brusco tal como un método de un solo rodillo, etc. puede llevarse a cabo en la atmósfera cuando no están contenidos metales activos, se lleva a cabo en un gas inerte tal como Ar, He, etc. o a vacío cuando están contenidos metales activos. También puede producirse en una atmósfera que contiene gas nitrógeno, gas monóxido de carbono o gas dióxido de carbono. La rugosidad superficial  $R_a$  de la cinta de aleación delgada es preferiblemente lo más pequeña posible. Específicamente, es preferiblemente de 5  $\mu\text{m}$  o menos, más preferiblemente de 2  $\mu\text{m}$  o menos.

Cuando una capa aislante se forma sobre al menos una superficie de la cinta de aleación delgada mediante recubrimiento de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc., un tratamiento de conversión química, un tratamiento de oxidación anódica, etc., si fuera necesario, se consigue una alta precisión en la medición de corriente que contiene componentes de alta frecuencia. El grosor de la capa aislante es preferiblemente de 0,5  $\mu\text{m}$  o menos, para evitar una disminución del factor de relleno del núcleo.

Tras enrollarse la cinta de aleación amorfa delgada para formar un núcleo toroidal, se lleva a cabo un tratamiento térmico en un gas inerte tal como gas argón, gas helio, gas nitrógeno, etc. o a vacío para obtener un núcleo magnético con una variación de rendimiento pequeña. Se aplica un campo magnético que presenta una intensidad suficiente para saturar la aleación (por ejemplo, de 40  $\text{kAm}^{-1}$  o más) durante al menos parte del tratamiento térmico, para proporcionar el núcleo con anisotropía magnética. La dirección de un campo magnético aplicado se alinea con la altura de un núcleo toroidal. El campo magnético aplicado puede ser un campo magnético de corriente continua, un campo magnético de corriente alterna, o un campo magnético pulsado. El campo magnético se aplica habitualmente a una temperatura de 200°C o mayor durante 20 minutos o más. Además, se aplica el campo magnético durante una elevación de temperatura, manteniendo una temperatura constante y enfriamiento, para proporcionar un transformador de corriente con una relación de cuadratura pequeña, una linealidad del lazo B-H mejorada, y valores absolutos pequeños de una diferencia de fase y un error de relación. Por el contrario, cuando no se aplica campo magnético alguno durante el tratamiento térmico, el transformador de corriente resultante presenta un rendimiento extremadamente escaso.

La mayor temperatura durante el tratamiento térmico es una temperatura de cristalización o mayor, específicamente de 450-700°C. En el caso de un patrón de tratamiento térmico que comprende un periodo de temperatura constante, el periodo de temperatura constante es habitualmente de 24 horas o menos, preferiblemente de 4 horas o menos desde el enfoque de una producción en masa. Una velocidad de elevación de temperatura promedio es preferiblemente de 0,1-100°C/minuto, más preferiblemente de 0,1-50°C/minuto, durante el tratamiento térmico. Una velocidad de refrigeración promedio es preferiblemente 0,1-50°C/minuto, más preferiblemente de 0,1-10°C/minuto. El enfriamiento se lleva a cabo a temperatura ambiente. Este tratamiento térmico dota al transformador de corriente de una linealidad de lazo B-H particularmente mejorada, diferencia de fase pequeña, y variación en valor absoluto pequeña de un error de relación.

El tratamiento térmico puede llevarse a cabo mediante una etapa o muchas etapas. Cuando se trata térmicamente un núcleo magnético grande, o cuando se tratan térmicamente muchos núcleos magnéticos, es preferible proceder a la cristalización lentamente elevando la temperatura a baja velocidad próxima a la temperatura de cristalización, o mantener la temperatura próxima a la temperatura de cristalización. Esto sirve para evitar que la temperatura del núcleo magnético se eleve demasiado por la generación de calor durante la cristalización, conduciendo al deterioro de las características. El tratamiento térmico se lleva a cabo preferiblemente en un horno eléctrico, pero la aleación puede calentarse haciendo fluir corriente continua, corriente alterna o corriente pulsada a través de la aleación.

El núcleo magnético resultante está contenido preferiblemente en una carcasa de aislamiento libre de esfuerzos de resinas fenólicas, etc. para evitar el deterioro del rendimiento, pero puede impregnarse o recubrirse con una resina, si fuera necesario. Un hilo de detección se enrolla alrededor de la carcasa que contiene el núcleo magnético para proporcionar un transformador de corriente. El núcleo de transformador de corriente de la presente invención presenta el máximo rendimiento para corriente superpuesta a corriente continua, particularmente adecuada para un

transformador de corriente para un medidor de potencia de integración adaptado según la regla IEC62053-21, una regla que puede utilizarse para forma de onda distorsionada.

(3) Estructura cristalina

5 La aleación nanocristalina a base de Fe para el núcleo de transformador de corriente de la presente invención presenta granos de cristal que presenta un tamaño de partícula promedio de 50 nm o menos, al menos parcialmente o en su totalidad. El porcentaje de los granos de cristal es del 30% o más, preferiblemente del 50% o más, particularmente del 60% o más, de la estructura de la aleación. Un tamaño de grano de cristal promedio deseable para proporcionar el núcleo de transformador de corriente con valores absolutos pequeños de una diferencia de fase y un error de relación es de 2-30 nm.

15 Los granos de cristal en la aleación nanocristalina a base de Fe presentan una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc) principalmente a base de FeCo o FeNi, en la que pueden estar disueltos Si, B, Al, Ge, Zr, etc., y que pueden presentar una red cristalina regular. Además, la aleación puede presentar parcialmente una fase cúbica centrada en las caras (fcc) que contiene Cu. La aleación está preferiblemente libre de una fase de compuesto, pero puede contener la fase de compuesto si ésta se encuentra en una cantidad pequeña.

20 Cuando la aleación presenta una fase distinta a los granos de cristal, esa fase es principalmente una fase amorfa. La existencia de la fase amorfa alrededor de los granos de cristal suprime el crecimiento de los granos de cristal, haciéndolos de ese modo más finos, y dotando a la aleación de una mayor resistividad y una menor histéresis de magnetización. Por tanto, el transformador de corriente está dotado de una diferencia de fase mejorada.

(4) Propiedades

25 (a) Densidad de flujo magnético

30 La aleación nanocristalina a base de Fe debe presentar una densidad de flujo magnético  $B_{8000}$  a  $8000 \text{ Am}^{-1}$  de 1,2 T o más. Cuando  $B_{8000}$  es menor de 1,2 T, no puede aumentarse el campo magnético anisotrópico  $H_K$ , de modo que el transformador de corriente no presenta características suficientes en aplicaciones en las que se utiliza una polarización de corriente continua grande, o en aplicaciones en las que se mide una corriente grande. Ajustando la composición de la aleación,  $B_{8000}$  puede ser de 1,6 T o más, adicionalmente de 1,65 T o más.

35 (b) Campo magnético anisotrópico

40 El campo magnético anisotrópico  $H_K$  es un parámetro físico que indica el campo magnético saturado de un núcleo magnético, que corresponde a un campo magnético en una flexión del lazo B-H, tal como se muestra en la figura 9. El núcleo de transformador de corriente de la presente invención presenta un campo magnético anisotrópico  $H_K$  de  $150\text{-}1500 \text{ Am}^{-1}$ . Con un campo magnético anisotrópico  $H_K$  en este intervalo además de una alta densidad de flujo magnético de saturación, el núcleo de transformador de corriente presenta un lazo B-H con una pequeña histéresis y una linealidad excelente.

(c) Relación de cuadratura

45 La aleación nanocristalina a base de Fe debe presentar una relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$  del 5% o menos. Cuando  $B_r/B_{8000}$  supera el 5%, el transformador de corriente presenta valores absolutos grandes de una diferencia de fase y un error de relación, dando como resultado características deterioradas, y más variaciones de características de detección de corriente tras la medición de una corriente grande. Ajustando la composición de la aleación,  $B_r/B_{8000}$  puede ser el 3% o menos, adicionalmente el 2,5% o menos.  $B_r$  representa una densidad de flujo magnético residual, y  $B_{8000}$  representa una densidad de flujo magnético cuando se aplica un campo magnético de  $8000 \text{ Am}^{-1}$ .

(d) Permeabilidad inicial específica de corriente alterna

55 La aleación nanocristalina a base de Fe presenta una permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  de 800-7000 a 50 Hz y  $0,05 \text{ Am}^{-1}$ . El núcleo de transformador de corriente compuesto por la aleación nanocristalina a base de Fe que presenta tal permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  puede realizar una transformación de corriente con una diferencia de fase pequeña y una variación pequeña del valor absoluto de un error de relación, en una medición de corriente polarizada con corriente sinusoidal de semionda o corriente continua. Ajustando la composición de la aleación, la permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  puede ser de 5000 o menos, adicionalmente de 4000 o menos.

[2] Transformador de corriente y medidor de potencia

65 El transformador de corriente de la presente invención comprende el núcleo magnético anterior, un devanado primario, al menos un devanado de detección secundario y una resistencia de carga conectada en paralelo al devanado de detección secundario. El devanado primario es habitualmente una vuelta que penetra en el núcleo. El

transformador de corriente de la presente invención puede medir corriente sinusoidal de semionda, corriente polarizada por corriente continua, etc. con valores absolutos pequeños de una diferencia de fase y un error de relación, una fácil corrección y una alta precisión. Conectada al devanado de detección del transformador de corriente de la presente invención se encuentra una resistencia variable que depende de la especificación de corriente. Particularmente, el transformador de corriente de la presente invención puede realizar una medición de alta precisión de corriente alterna, sinusoidal, de semionda con una diferencia de fase de  $5^\circ$  o menos en un intervalo de corriente nominal y el valor absoluto de un error de relación dentro del 3%. Además, el transformador de corriente de la presente invención presenta mejores características de temperatura que los convencionales que utilizan Parmalloy o aleaciones amorfas a base de Co.

El medidor de potencia que comprende el transformador de corriente de la presente invención está adaptado según la regla IEC62053-21, una regla que puede utilizarse para formas de onda distorsionadas (formas de onda de semionda rectificadas), de modo que puede realizar una medición de potencia de corrientes con forma de onda distorsionada.

La presente invención se explicará con mayor detalle haciendo referencia a los ejemplos a continuación sin la intención de restringir la presente invención a los mismos.

### Ejemplo 1

Se enfrió bruscamente una masa fundida de aleación de  $Fe_{83-x}Co_xCu_1Nb_7Si_1B_8$  (en % atómico) mediante un método de un solo rodillo, para obtener una cinta de aleación amorfa delgada de 5 mm de ancho y 21  $\mu m$  de grosor. Se enrolló esta cinta de aleación amorfa delgada alrededor de un núcleo toroidal que presentaba un diámetro externo de 30 mm y un diámetro interno de 21 mm. Se situó el núcleo magnético en un horno de tratamiento térmico lleno de gas nitrógeno, para llevar a cabo un tratamiento térmico mientras se aplicaba un campo magnético de  $280 \text{ kAm}^{-1}$  en una dirección perpendicular al circuito magnético del núcleo magnético (en la dirección de la anchura de la cinta de aleación delgada, o en la dirección de la altura del núcleo magnético). Un patrón de tratamiento térmico utilizado comprendía la elevación de temperatura a  $10^\circ\text{C}/\text{minuto}$ , mantenimiento a  $550^\circ\text{C}$  durante 1 hora y enfriamiento a  $2^\circ\text{C}/\text{minuto}$ . La observación mediante un microscopio electrónico reveló que la aleación tratada térmicamente presentaba una estructura, de la cual aproximadamente el 70% estaba ocupada por granos de cristal que presentaban un tamaño de partícula de aproximadamente 10 nm y una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, presentando parte de la fase cristalina una red cristalina regular. El resto de la estructura era principalmente una fase amorfa. Un patrón de difracción de rayos X indicó picos correspondientes a una fase cristalina cúbica centrada en el cuerpo.

Se midió esta aleación de  $Fe_{83-x}Co_xCu_1Nb_7Si_1B_8$  (en % atómico) con respecto a una densidad de flujo magnético  $B_{8000}$  a  $8000 \text{ Am}^{-1}$ , una relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$ , coercitividad  $H_c$ , una permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  a 50 Hz y  $0,05 \text{ Am}^{-1}$  y un campo magnético anisotrópico  $H_k$ . Se muestran los resultados en las figuras 1 a 5. Esta aleación presentó una densidad de flujo magnético  $B_{8000}$  relativamente alta cuando Co estaba en un intervalo del 3-50% atómico. La relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$  fue de tan sólo el 5% o menos cuando Co estaba en un intervalo del 3-50% atómico. La coercitividad  $H_c$  fue relativamente baja cuando Co estaba en un intervalo del 3-50% atómico, pero aumentó drásticamente cuando Co superó el 50% atómico. La permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  disminuyó a medida que aumentaba la cantidad de Co, alcanzando 7000 o menos cuando Co era del 3% atómico o más, y menor de 800 cuando Co superó el 50% atómico. El campo magnético anisotrópico  $H_k$  aumentó a medida que aumentaba la cantidad de Co, alcanzando  $150 \text{ Am}^{-1}$  o más cuando Co era del 3% atómico o más, y  $1500 \text{ Am}^{-1}$  cuando Co era del 50% atómico.

Se dotó el núcleo magnético ( $x =$  el 25% atómico) de un devanado primario de una vuelta, un devanado de detección secundario de 2500 vueltas y una resistencia de carga de  $100 \Omega$  conectada en paralelo al devanado de detección secundario, para producir un transformador de corriente. Se suministró corriente alterna sinusoidal de 50 Hz y 30 A al devanado primario para medir una diferencia de fase y un error de relación (expresado en valor absoluto) a  $23^\circ\text{C}$ . Como resultado, la diferencia de fase  $\theta$  fue de  $0,5^\circ$ , y el error de relación RE fue del 0,1 %, al contenido de Co,  $x$  del 0% atómico. Además, la diferencia de fase  $\theta$  fue de  $1,3^\circ$ , y el error de relación RE fue del 0,2%, al contenido de Co,  $x$  del 16% atómico. La diferencia de fase  $\theta$  fue de  $2,5^\circ$ , y el error de relación RE fue del 1,7%, al contenido de Co,  $x$  del 25% atómico. La diferencia de fase  $\theta$  fue de  $2,6^\circ$ , y el error de relación RE fue del 1,1%, al contenido de Co,  $x$  del 30% atómico. Además, mediante las siguientes reglas se evaluó cómo de bien pudo medirse una corriente alterna, sinusoidal, de semionda que presentaba una altura de onda de 30 A. Se muestran los resultados en la tabla 1.

Buena: Medida de manera precisa.

Aceptable: Medida sin precisión.

Mala: No pudo medirse.



Contenido de Co, x (en % atómico)	0	1	3	16	25	30	40	50	70	80
Medición	Mala	Mala	Aceptable	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Mala	Mala

5 El núcleo de transformador de corriente de la presente invención compuesto por la aleación nanocristalina a base de Fe que presentaba un contenido de Co, x de 10-50 pudo medir corriente alterna, sinusoidal, de semionda y corriente superpuesta a corriente continua. También presentó una pequeña diferencia de fase de hasta 3° o menos, y un pequeño error de relación de hasta el 2% o menos en valor absoluto.

**Ejemplo 2**

10 Se enfriaron bruscamente masas fundidas de aleación que presentaban las composiciones mostradas en la tabla 2 mediante un método de un solo rodillo en una atmósfera de Ar, para obtener cintas de aleación amorfa delgadas de 5 mm de anchura y 21 μm de grosor. Se enrolló cada cinta de aleación amorfa delgada alrededor de un núcleo de transformador de corriente que presentaba un diámetro externo de 30 mm y un diámetro interno de 21 mm. Se trató térmicamente cada núcleo magnético de la misma manera que en el ejemplo 1, y se sometió entonces a medición magnética. En la estructura de aleación tratada térmicamente, se generaron granos de cristal ultrafinos que  
 15 presentaban un tamaño de partícula de 50 nm o menos. El n.º 33 representa un núcleo magnético compuesto por una aleación nanocristalina a base de Fe (ejemplo comparativo), el n.º 34 representa un núcleo magnético compuesto por una aleación amorfa a base de Co (ejemplo comparativo), y el n.º 35 representa un núcleo magnético compuesto por Parmalloy (ejemplo comparativo).

20 Con respecto a un transformador de corriente producido utilizando cada núcleo magnético, se midieron una diferencia de fase y un error de relación de corriente nominal (expresados en valor absoluto), una densidad de flujo magnético  $B_{8000}$ , una relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$ , una permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_i$  y un campo magnético anisotrópico  $H_K$  a 23°C de la misma manera que en el ejemplo 1. Además, mediante las siguientes reglas se evaluó cómo de bien se midió una corriente alterna, sinusoidal, de semionda que presentaba una altura de  
 25 30 A. Se muestran los resultados en la tabla 2.

Buena: Medida de manera precisa.

30 Mala: No pudo medirse de manera precisa.

Tabla 2

N.º	Composición (en % atómico)	B <sub>8000</sub> (T)	B <sub>r</sub> /B <sub>8000</sub> (%)	μ <sub>r</sub>
1	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub>	1,51	1	2200
2	Fe <sub>res</sub> Co <sub>15,3</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>9</sub>	1,47	1	3400
3	Fe <sub>res</sub> Ni <sub>15,3</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>2,5</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub>	1,28	1	1700
4	Fe <sub>res</sub> Co <sub>10</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>0,8</sub> Nb <sub>2,5</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub>	1,38	2	1900
5	Fe <sub>res</sub> Co <sub>20</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>13</sub> B <sub>9</sub> Mn <sub>0,5</sub>	1,26	1	2700
6	Fe <sub>res</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>0,9</sub> Nb <sub>2,5</sub> Si <sub>15,5</sub> B <sub>7</sub> Cr <sub>0,5</sub>	1,23	1	2400
7	Fe <sub>res</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>2,8</sub> Si <sub>16,5</sub> B <sub>7</sub> Sn <sub>0,1</sub>	1,24	1	2300
8	Fe <sub>res</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>15</sub> B <sub>6,5</sub> Zn <sub>0,1</sub>	1,27	1	2300
9	Fe <sub>res</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>0,6</sub> Nb <sub>2,6</sub> Si <sub>8</sub> B <sub>10</sub> In <sub>0,1</sub>	1,59	1	2400
10	Fe <sub>res</sub> Co <sub>35</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Ag <sub>0,1</sub>	1,52	1	1800
11	Fe <sub>res</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>0,5</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>9</sub> Au <sub>0,5</sub>	1,50	1	2200
12	Fe <sub>res</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Sc <sub>0,1</sub>	1,51	1	2400
13	Fe <sub>res</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Pt <sub>0,1</sub>	1,52	1	2300
14	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Pd <sub>0,1</sub>	1,52	1	2200
15	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>2</sub> Si <sub>7</sub> B <sub>12</sub> Ru <sub>0,1</sub>	1,54	1	2100
16	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Mg <sub>0,01</sub>	1,53	1	2200
17	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>2,6</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Ca <sub>0,01</sub>	1,53	1	2100
18	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>2,7</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Sr <sub>0,01</sub>	1,52	1	2100
19	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> C <sub>0,01</sub>	1,51	2	2100
20	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Ge <sub>0,5</sub>	1,50	1	2100
21	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>9</sub> Ga <sub>0,5</sub>	1,52	1	2200
22	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>9</sub> Al <sub>2</sub>	1,49	2	1800
23	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>7</sub> Si <sub>2</sub> B <sub>9</sub> P <sub>1</sub>	1,71	1	1100
24	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>7</sub> Si <sub>1</sub> B <sub>9</sub> Ba <sub>0,5</sub>	1,72	1	1200
25	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Zr <sub>7</sub> Si <sub>1</sub> B <sub>9</sub> Sm <sub>0,01</sub>	1,70	2	1100
26	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>0,5</sub> Hf <sub>7</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Nd <sub>0,01</sub>	1,71	2	1100
27	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1,5</sub> Ta <sub>3</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub> Be <sub>0,1</sub>	1,50	1	2200
28	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Mo <sub>3</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>9</sub>	1,48	3	2100
29	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> V <sub>1</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>9</sub>	1,47	2	2000
30	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> W <sub>3</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>9</sub>	1,46	3	1900
31	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Zr <sub>7</sub> B <sub>8</sub>	1,76	2	1000
32	Fe <sub>res</sub> Co <sub>30</sub> Cu <sub>1</sub> Zr <sub>7</sub> Si <sub>3</sub> B <sub>4</sub>	1,75	3	1100
33*	Fe <sub>res</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>15,7</sub> B <sub>7</sub>	1,2	2.6	82000
34*	Co <sub>res</sub> Fe <sub>1,5</sub> Mn <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> B <sub>17</sub> amorfa	1,0	1	1500
35*	Permalloy	0,75	12	36000

Nota: \* Ejemplo comparativo

N.º	$H_K$ ( $\text{Am}^{-1}$ )	Error de relación RE (%)	Diferencia de fase $\theta$ (°)	Medición
1	590	2,1	2,5	Buena
2	326	0,1	1,2	Buena
3	445	1,8	3,2	Buena
4	628	0,9	1,4	Buena
5	429	0,8	1,3	Buena
6	400	1,8	1,7	Buena
7	410	1,8	2,4	Buena
8	420	1,7	2,5	Buena
9	517	0,8	2,3	Buena
10	612	1,8	3,0	Buena
11	500	0,9	2,4	Buena
12	505	0,8	2,2	Buena
13	505	0,9	2,4	Buena
14	495	0,9	2,4	Buena
15	500	1,0	2,5	Buena
16	500	0,9	2,4	Buena
17	510	1,0	2,5	Buena
18	500	1,1	2,5	Buena
19	498	1,0	2,5	Buena
20	494	1,0	2,5	Buena
21	506	0,9	2,3	Buena
22	486	1,3	2,7	Buena
23	1150	3,0	3,6	Buena
24	1100	2,9	3,4	Buena
25	1160	3,0	3,6	Buena
26	1180	2,9	3,4	Buena
27	610	0,9	2,4	Buena
28	520	1,0	2,4	Buena
29	550	1,2	2,8	Buena
30	500	1,2	2,6	Buena
31	1200	3,0	3,7	Buena
32	1130	2,9	3,5	Buena
33*	12,8	0,08	0,4	Mala
34*	490	3,5	4,5	Buena
35*	17,8	0,20	0,21	Mala

Nota: \* Ejemplo comparativo

Los datos en la tabla 2 indican que el núcleo de transformador de corriente de la presente invención presenta valores absolutos pequeños de una diferencia de fase y un error de relación, y pueden utilizarse particularmente para una corriente de forma de onda asimétrica tal como corriente alterna, sinusoidal, de semionda. Por otro lado, se tuvieron dificultades con los núcleos magnéticos compuestos por una aleación nanocristalina a base de Fe convencional (n.º 33) y Parmalloy (n.º 35) para llevar a cabo la medición precisa de corriente alterna, sinusoidal, de semionda. Además, el núcleo magnético compuesto por la aleación amorfa a base de Co convencional (n.º 34) presentó mayores valores absolutos de una diferencia de fase y un error de relación que los del núcleo de transformador de corriente de la presente invención. Se confirmó que el núcleo de la presente invención podía utilizarse para transformadores de corriente en una amplia gama de aplicaciones tales como medidores de potencia de integración, equipos industriales, etc.

### 15 Ejemplo 3

Se enfrió bruscamente una masa fundida de aleación de  $\text{Fe}_{53,8}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{0,7}\text{Nb}_{2,6}\text{Si}_9\text{B}_9$  (en % atómico) mediante un método de un solo rodillo para obtener una cinta de aleación amorfa delgada de 5 mm de anchura y 21  $\mu\text{m}$  de grosor. Se enrolló esta cinta de aleación amorfa delgada alrededor de un núcleo toroidal que presentaba un diámetro externo de 30 mm y un diámetro interno de 21 mm. Se situó el núcleo magnético en un horno de tratamiento térmico que presentaba una atmósfera de gas nitrógeno, y se trató térmicamente de la misma manera que en el ejemplo 1, excepto porque el patrón de tratamiento térmico comprendió una elevación de temperatura a 5°C/minuto, mantenimiento a 530°C durante 2 horas y enfriamiento a 1°C/minuto. La observación mediante un microscopio electrónico reveló que la aleación tratada térmicamente presentaba una estructura, de la que aproximadamente el 72% estaba ocupada por granos de cristal que presentaban un tamaño de partícula de aproximadamente 10 nm y una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, siendo el resto principalmente una fase amorfa. Un patrón de difracción de rayos X indicó picos de cristal que correspondían a la fase cristalina cúbica centrada en el cuerpo.

La medición reveló que esta aleación de  $\text{Fe}_{53,8}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{0,7}\text{Nb}_{2,6}\text{Si}_9\text{B}_9$  (en % atómico) presentaba una densidad de flujo magnético  $B_{8000}$  a  $8000 \text{ Am}^{-1}$  de 1,50 T, una relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$  del 1%, una coercitividad  $H_c$  de  $2,1 \text{ Am}^{-1}$ , una permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  de 2200 a 50 Hz y  $0,05 \text{ Am}^{-1}$  y un campo magnético anisotrópico  $H_K$  de  $406 \text{ Am}^{-1}$ .

La figura 6 muestra los lazos B-H de corriente continua del núcleo de transformador de corriente de la presente invención y el núcleo amorfo a base de Co convencional [n.º 34 (ejemplo comparativo) producido en el ejemplo 2], y la figura 7 muestra la dependencia del campo magnético de la permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  a 50 Hz del núcleo de transformador de corriente de la presente invención. El núcleo de transformador de corriente de la presente invención presentó una mayor permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  que la del núcleo de aleación amorfa a base de Co que presentaba el mismo nivel de  $H_K$ , y una permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  sustancialmente constante en un intervalo de campo magnético igual a o menor que  $H_K$ . El transformador de corriente de la presente invención que utiliza este núcleo magnético puede utilizarse con características excelentes incluso en superposición de corriente continua como corriente alterna, sinusoidal, de semionda.

Se dotó cada núcleo magnético de un devanado primario de una vuelta, un devanado de detección secundario de 2500 vueltas y una resistencia de carga de 100  $\Omega$  conectada en paralelo al devanado de detección secundario, para producir un transformador de corriente. Cuando se suministró corriente alterna sinusoidal de 50 Hz y 30A al devanado primario, los valores absolutos de una diferencia de fase y un error de relación a 23°C fueron del 2,0% y de 2,4° en el transformador de corriente de la presente invención, y del 3,6% y de 4,6° en el transformador de corriente de la aleación amorfa a base de Co.

El medidor de potencia producido utilizando el transformador de corriente de la presente invención pudo llevar a cabo una medición de potencia no sólo para corriente alterna, sinusoidal con simetría positiva-negativa, sino también para corriente alterna, sinusoidal, de semionda.

### 55 Efecto de la invención

El núcleo de transformador de corriente de la presente invención que presenta una baja densidad de flujo magnético residual, una pequeña histéresis y una buena linealidad de la curva de magnetización, que no es fácilmente saturable y genera un campo magnético anisotrópico  $H_K$  relativamente grande, proporciona transformadores de corriente y medidores de potencia pequeños, económicos y térmicamente estables con amplios intervalos de medición de corriente. Particularmente, puede medirse de manera precisa incluso corriente de forma de onda asimétrica tal como corriente alterna, sinusoidal, de semionda, y corriente alterna superpuesta a corriente continua.

**REIVINDICACIONES**

1. Núcleo de transformador de corriente realizado en una aleación que presenta una composición representada por la fórmula general  $Fe_{100-x-a-y-c}M_xCu_aM'_yX'_c$  (en % atómico), en el que
- 5 M es Co y/o Ni,
- M' es por lo menos un elemento seleccionado de entre el grupo que consiste en V, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta y W,
- 10 X' es Si y/o B,
- x, a, y y c son números que satisfacen  $15 \leq x \leq 40$ ,  $0,1 \leq a \leq 3$ ,  $1 \leq y \leq 10$ ,  $2 \leq c \leq 30$  y  $7 \leq y + c \leq 31$ , respectivamente,
- 15 30% o más de la estructura de la aleación está compuesta por granos de cristal que presentan un tamaño de partícula promedio de 50 nm o inferior,
- caracterizado por que
- 20 dicha aleación presenta una densidad de flujo magnético  $B_{8000}$  de 1,2 T o superior a  $8.000 \text{ Am}^{-1}$ , un campo magnético anisotrópico  $H_K$  de  $150-1.500 \text{ Am}^{-1}$ , una relación de cuadratura  $B_r/B_{8000}$  de 5% o inferior y una permeabilidad inicial específica de corriente alterna  $\mu_r$  de  $800-7.000$  a  $50 \text{ Hz}$  y  $0,05 \text{ Am}^{-1}$ , y
- 25 el núcleo de transformador de corriente está adaptado para detectar corriente alterna, sinusoidal, de semionda.
2. Núcleo de transformador de corriente según la reivindicación 1, en el que el contenido x de M cumple  $22 \leq x \leq 35$ .
3. Núcleo de transformador de corriente según la reivindicación 1 o 2, en el que el contenido de B es de 4 a 12% atómico.
- 30 4. Núcleo de transformador de corriente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el contenido de Si es de 0,5 a 17% atómico.
5. Núcleo de transformador de corriente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que parte de dicho M' se sustituye por al menos un elemento seleccionado de entre el grupo que consiste en Cr, Mn, Sn, Zn, In, Ag, Au, Sc, elementos del grupo del platino, Mg, Ca, Sr, Ba, Y, elementos de las tierras raras, N, O y S.
- 35 6. Núcleo de transformador de corriente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que parte de dicho X' se sustituye por al menos un elemento seleccionado de entre el grupo que consiste en C, Ge, Ga, Al, Be y P.
- 40 7. Núcleo de transformador de corriente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que es sometido a un tratamiento térmico en un campo magnético, que comprende mantenerlo a una temperatura de  $450$  a  $700^\circ\text{C}$  durante 24 horas o menos mientras se aplica un campo magnético de  $40 \text{ kAm}^{-1}$  o más en la dirección de la altura del núcleo, y después enfriarlo hasta la temperatura ambiente.
- 45 8. Transformador de corriente, que comprende
- el núcleo según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7,
- 50 un devanado primario,
- por lo menos un devanado de detección secundario, y
- una resistencia de carga conectada en paralelo a dicho devanado de detección secundario.
- 55 9. Transformador de corriente según la reivindicación 8, en el que dicho devanado primario presenta 1 vuelta.
10. Transformador de corriente según la reivindicación 8 o 9, que presenta una diferencia de fase dentro de  $5^\circ$  en un intervalo de corriente nominal, y un error de relación dentro de 3% (valor absoluto) a  $23^\circ\text{C}$ .
- 60 11. Medidor de potencia que comprende el transformador de corriente según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10 y que está adaptado para multiplicar el valor de la corriente obtenido por el transformador de corriente y la tensión en ese momento para calcular la potencia utilizada.

Fig. 1

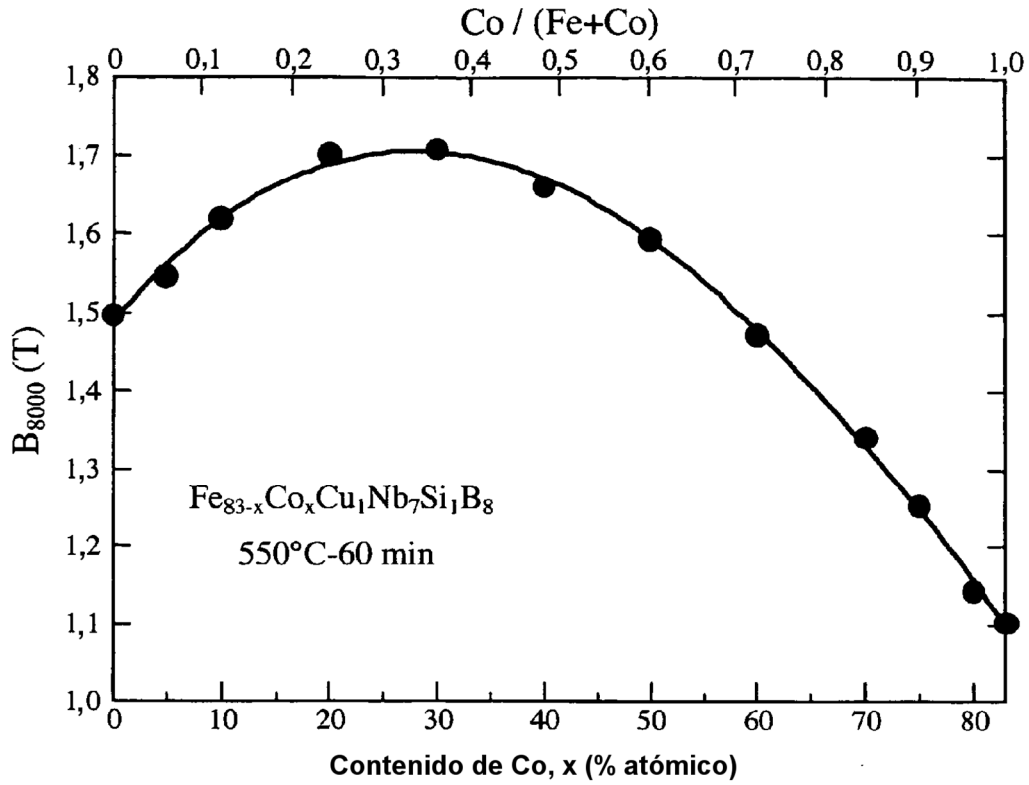


Fig. 2

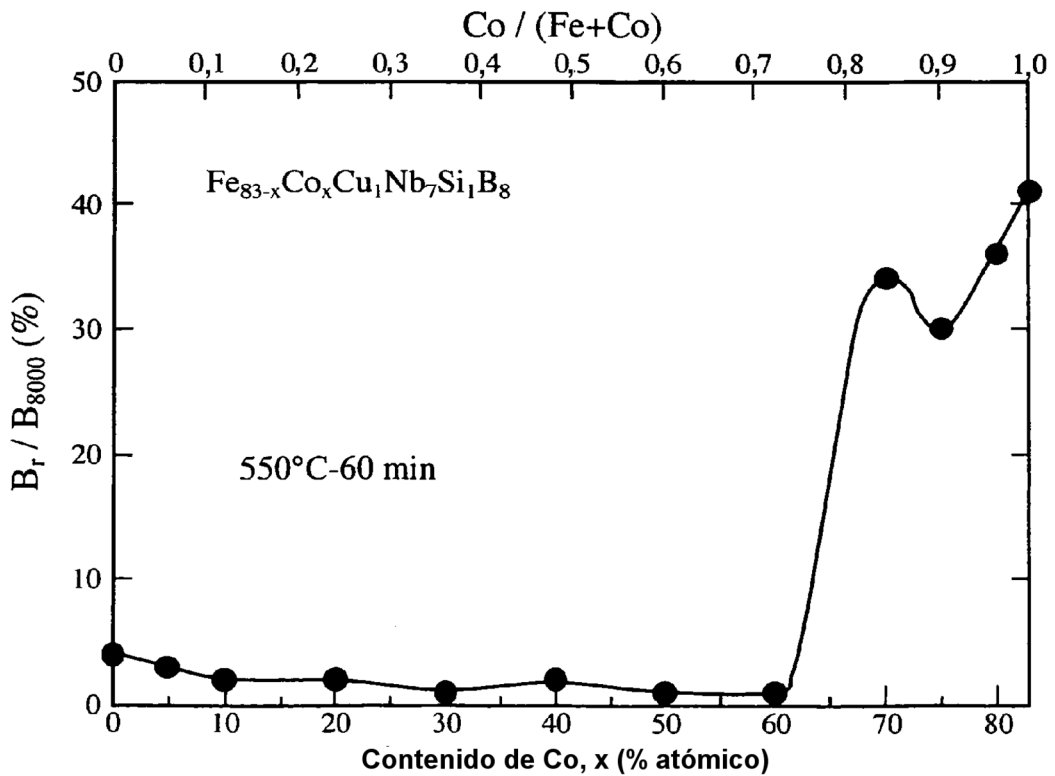


Fig. 3

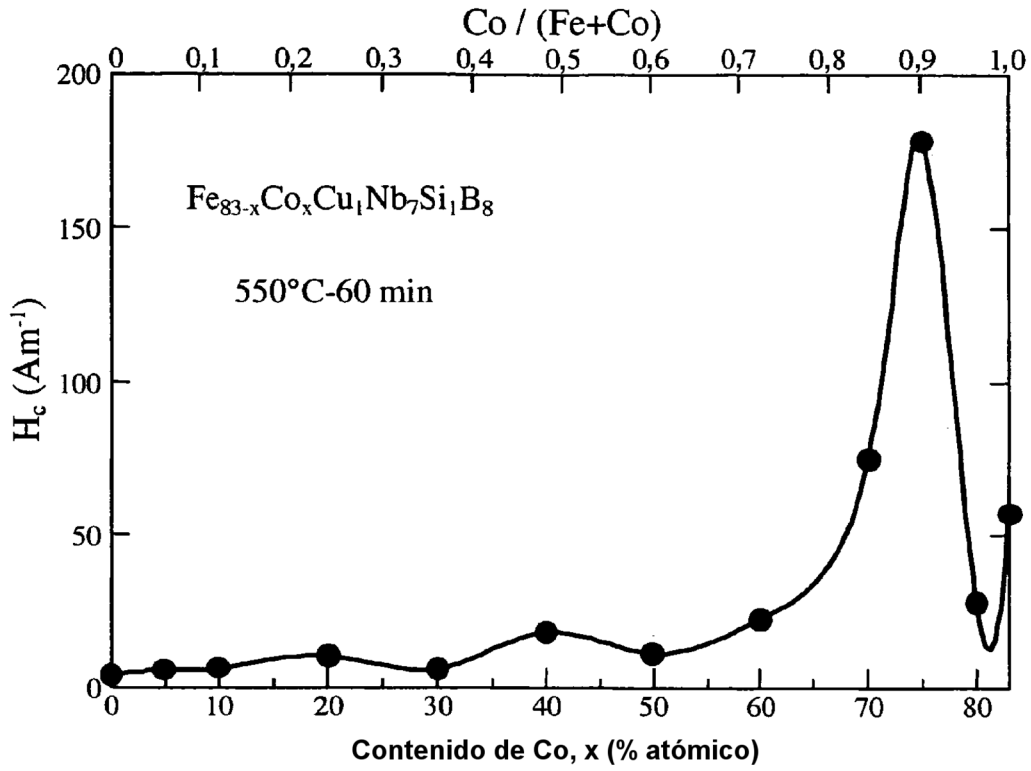


Fig. 4

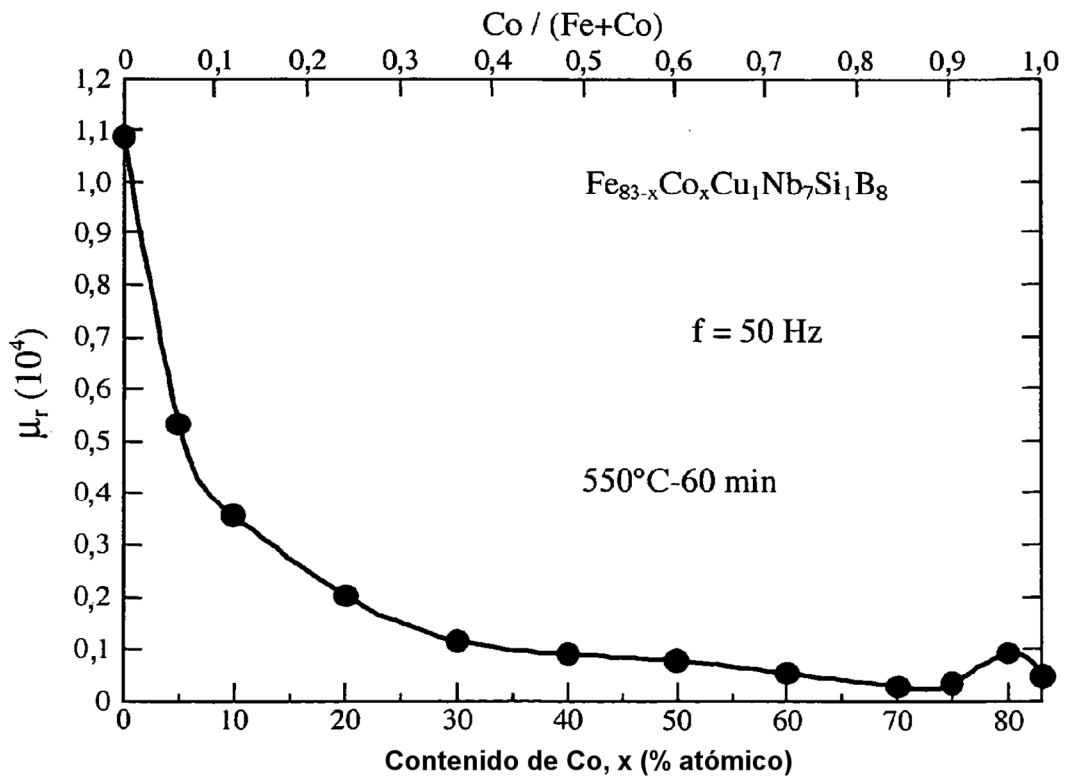


Fig. 5

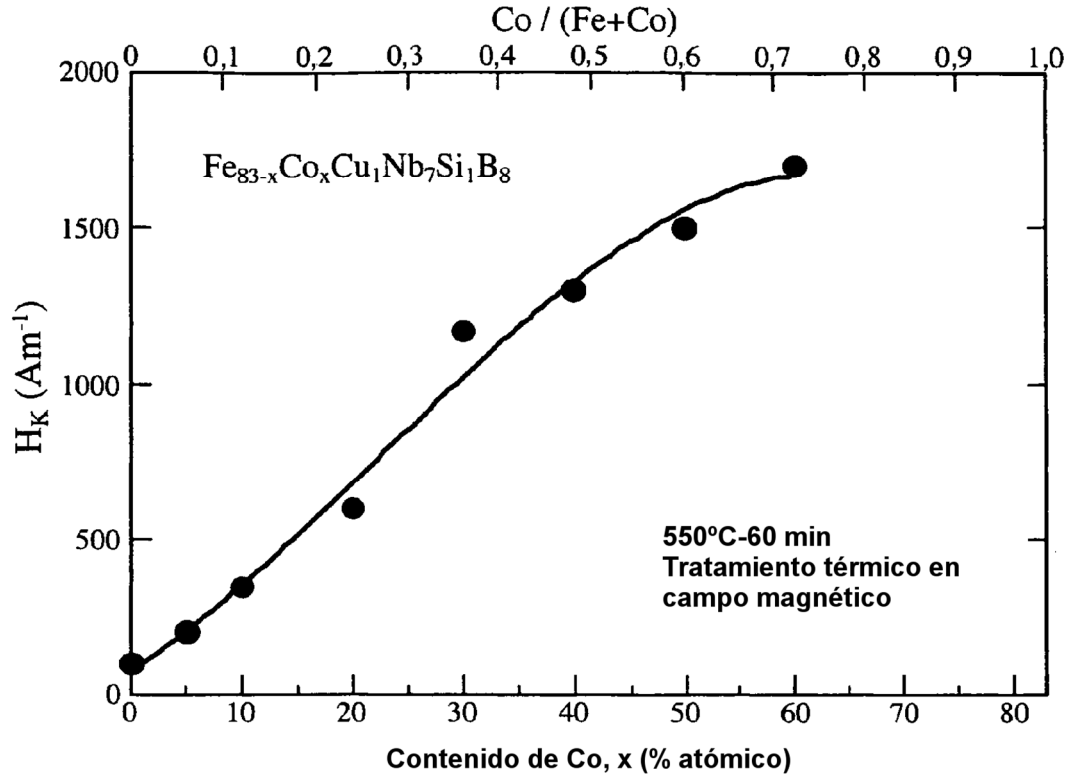


Fig. 6

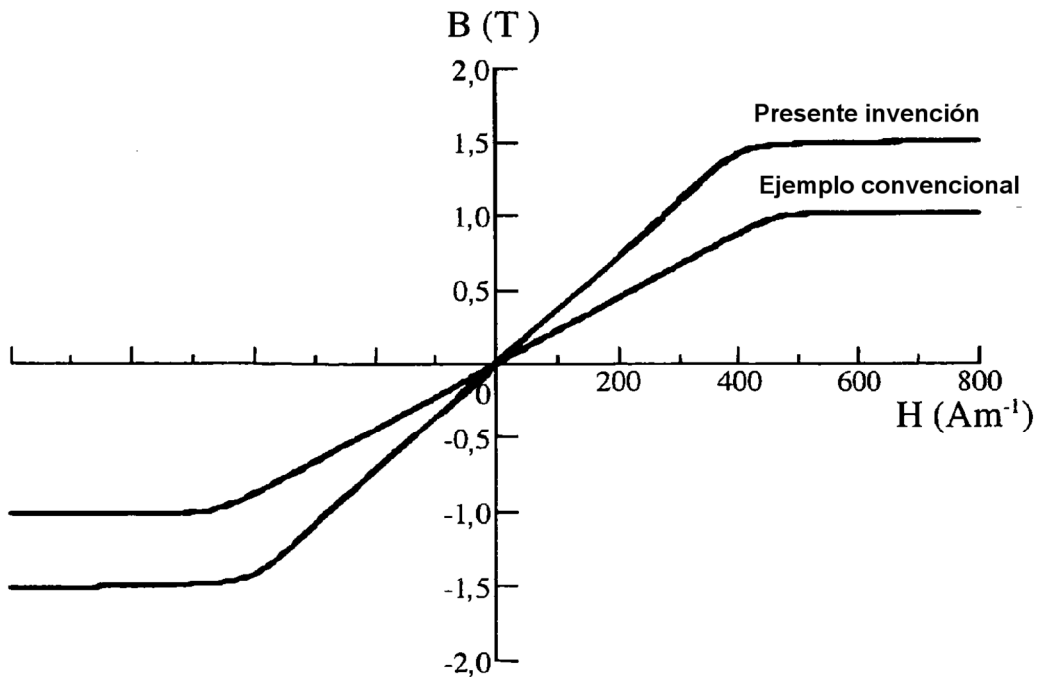




Fig. 7

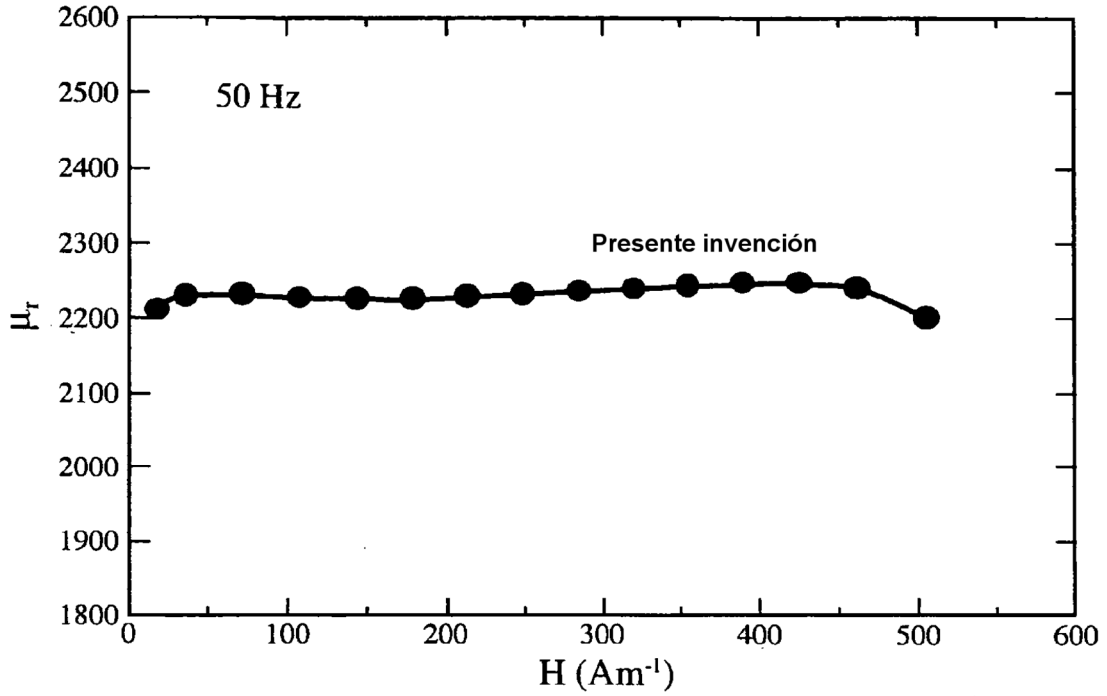


Fig. 8

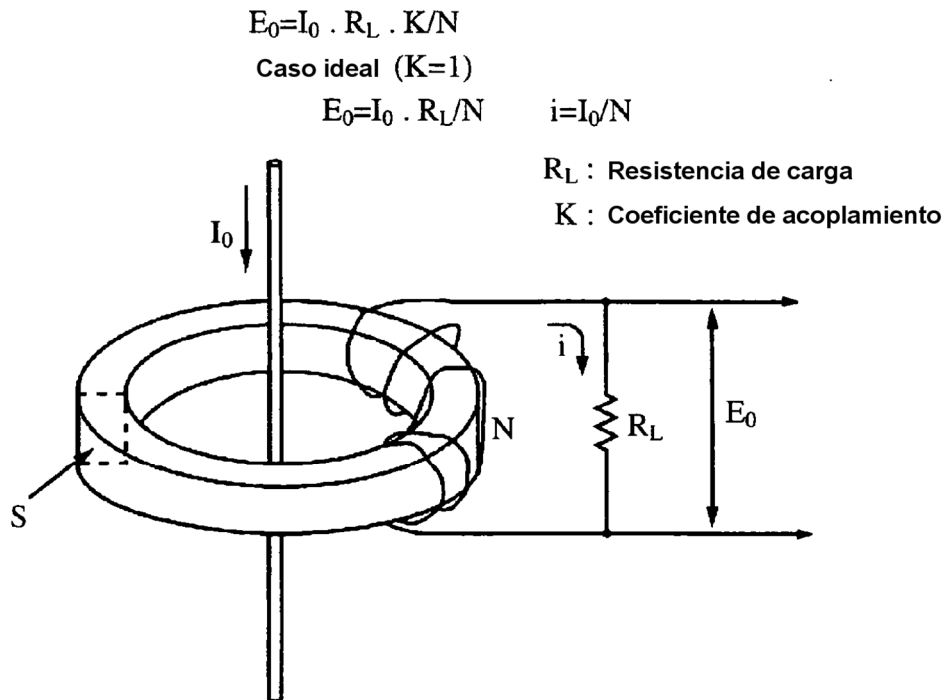


Fig. 9

