

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 959 533**

51 Int. Cl.:

G01N 27/90

(2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.05.2015** **PCT/FR2015/051219**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.11.2015** **WO15173497**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.05.2015** **E 15724346 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.07.2023** **EP 3143390**

54 Título: **Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault**

30 Prioridad:

16.05.2014 FR 1454411

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

26.02.2024

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
25, Rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**DELABRE, BENJAMIN y
DECITRE, JEAN-MARC**

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 959 533 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

Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault.

10 Un sensor de inspección no destructiva de este tipo utiliza la propiedad electromagnética de las corrientes de Foucault para la detección de defectos tales como entallas, grietas o corrosiones en estructuras conductoras de escaso grosor, no necesariamente planas, tales como piezas metálicas aeronáuticas o nucleares. Por ejemplo, esta tecnología permite la inspección de tubos de generadores de vapor en centrales nucleares.

15 Un cabezal de inspección de un sensor de este tipo incluye generalmente al menos una bobina, entre ellas al menos una bobina con funciones de emisión alimentada con corriente alterna y al menos una bobina con funciones de recepción por la que circula una corriente inducida y que presenta entonces una fuerza electromotriz o una impedancia inducida de igual frecuencia que la de la corriente alterna de alimentación. Se hace notar que una misma bobina puede tener perfectamente funciones comunes de emisión y de recepción. Más exactamente, cuando el cabezal de inspección del sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault se encuentra dispuesto en la proximidad de una pieza que ha de inspeccionarse, la bobina con funciones de emisión es alimentada con señal senoidal. Entonces, se emite en el aire y en la pieza que ha de inspeccionarse un campo electromagnético de igual frecuencia. De ello resulta, en los bornes de la bobina con funciones de recepción, una fuerza electromotriz inducida o una impedancia inducida proveniente, por una parte, del acoplamiento entre la bobina con funciones de emisión y la bobina con funciones de recepción (resultando modificado este acoplamiento en presencia de la pieza) y, por otra, del campo magnético irradiado por las corrientes inducidas en la pieza y que traduce la presencia eventual de un defecto en esta última.

20 En una configuración con funciones de emisión y recepción separadas, un cabezal de inspección puede incluir una primera bobina con funciones de emisión y una segunda bobina con funciones de recepción. En modo diferencial de recepción, un cabezal de inspección de esta configuración puede incluir una primera bobina con funciones de emisión y otras dos bobinas con funciones de recepción en montaje diferencial. En modo diferencial de emisión, un cabezal de inspección de esta configuración puede incluir dos bobinas con funciones de emisión en montaje diferencial y una tercera bobina con funciones de recepción. En todos los casos, la fuerza electromotriz inducida o la impedancia puede ser medida en la o las bobinas con funciones de recepción mediante un dispositivo adaptado. En muchos casos, se advierte que una configuración con funciones de emisión y recepción separadas permite reducir acusadamente las perturbaciones debidas al fenómeno de entrehierro.

25 En otra configuración con funciones de emisión y recepción comunes, un cabezal de inspección puede incluir una misma bobina con funciones simultáneas de emisión y de recepción o dos bobinas con funciones simultáneas de emisión y de recepción. En modo diferencial de recepción o de emisión, las dos bobinas de que se trate pueden estar en montaje diferencial, por ejemplo, en un circuito en puente de Wheatstone. En todos los casos, solo la impedancia inducida puede ser medida en la o las bobinas con funciones comunes de emisión y de recepción mediante un dispositivo adaptado, por ejemplo, un analizador de impedancia.

30 Por otro lado, en una u otra de las configuraciones citadas, cabe contemplar un mayor número de bobinas.

En todos los casos, la configuración geométrica de las bobinas se puede optimizar al fabricar un cabezal de inspección basándose en ciertos criterios de funcionamiento.

35 Así, la invención es de aplicación más en particular en la fabricación de cabezales de inspección que incluyen al menos una bobina, entre ellas al menos una bobina con funciones de emisión y al menos una bobina con funciones de recepción, y se refiere a un procedimiento de fabricación que incluye las siguientes etapas:

- optimización de una configuración geométrica de dicha al menos una bobina del cabezal de inspección basándose en al menos un criterio predeterminado, y
- fabricación del cabezal de inspección cumpliendo la configuración geométrica de dicha al menos una bobina que materializa esta optimización.

40 En cierto número de publicaciones, tales como las patentes FR 2 881 827 B1, FR 2 904 694 B1 y FR 2 985 027 B1, la configuración geométrica de las bobinas de un cabezal de inspección se optimiza basándose en uno o varios de los siguientes criterios, eventualmente combinados:

- minimización de una fuerza electromotriz inducida en al menos una bobina con funciones de recepción cuando el cabezal de inspección está a una distancia nominal predeterminada de una pieza objeto de inspección sin defectos, calificándose esta fuerza electromotriz inducida, en esta situación, como acoplamiento directo,

- maximización de una variación de la fuerza electromotriz inducida cuando esta variación se debe a la presencia de un defecto que ha de detectarse en la pieza objeto de inspección, y

5 • optimización de otra variación de la fuerza electromotriz inducida cuando esta otra variación se debe a una variación de distancia entre el cabezal de inspección y la pieza objeto de inspección, es decir, a una variación de entrehierro.

10 Pero la pieza objeto de inspección, aparte de los defectos que puede incluir y las variaciones de entrehierro que pueden repercutir en su inspección, también puede presentar una inhomogeneidad de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética que podría ser interesante tener en cuenta, e incluso evaluar. Ahora bien, en ninguno de los citados documentos se alude ni aborda este problema. Por otro lado, otros documentos hacen alusión a este problema, pero lo abordan proponiendo soluciones complejas de modo que, a día de hoy, no deja de ser difícil estimar simplemente la conductividad eléctrica o la permeabilidad magnética de un material.

15 Así, por ejemplo, la patente DE 31 20 522 C2 trata de un cabezal de inspección de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault, que comprende una sola bobina con funciones de emisión y recepción comunes, y da a conocer la utilización de un ábaco en el plano complejo de medición de impedancia para diferentes frecuencias, con el propósito de estimar las propiedades electromagnéticas de una pieza objeto de inspección. Pero las curvas no lineales obtenidas no permiten estimar correctamente la conductividad eléctrica o la permeabilidad magnética, por causa de numerosos parámetros de influencia que inducen incertidumbres.

20 Se dan a conocer otros métodos no menos complejos en las solicitudes de patente US 2.005/0.017.713 A1 y US 2.007/0.114.993 A1. Estas tratan de estimar las propiedades electromagnéticas de una pieza objeto de inspección, siendo aptas al mismo tiempo para detectar conjuntamente eventuales defectos en esa pieza, pero solo lo consiguen parcialmente. En particular, el documento US 2.005/0.017.713 A1 se basa en una correlación entre la bajada de conductividad eléctrica de la pieza (en este caso particular, una soldadura) y la presencia de un defecto, mientras que la conductividad eléctrica puede evolucionar independientemente de la presencia de un defecto eventual, y puede quererse medir o detectar ambas independientemente. El documento US 2.009/079.424 A1 da a conocer un procedimiento de optimización de un cabezal de inspección no destructiva, pero se utilizan diferentes criterios de diseño.

25 Así, se puede desear prever un procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault que permita obviar al menos una parte de los problemas y restricciones citados.

30 Por lo tanto, la invención tiene por objeto un procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault, incluyendo este cabezal de inspección al menos una bobina, entre ellas al menos una bobina con funciones de emisión y al menos una bobina con funciones de recepción, que incluye las siguientes etapas:

- optimización de una configuración geométrica de dicha al menos una bobina del cabezal de inspección basándose en al menos un criterio de optimización predeterminado,

35 • fabricación del cabezal de inspección cumpliendo la configuración geométrica de dicha al menos una bobina que materializa esta optimización,

40 en donde la optimización de la configuración geométrica de dicha al menos una bobina se realiza al menos con un criterio de optimización del cumplimiento de una relación de proporcionalidad entre una variación de la parte imaginaria de una magnitud eléctrica compleja inducida en dicha al menos una bobina con funciones de recepción y una variación de la parte real de esa magnitud eléctrica compleja, cuando estas variaciones, determinantes de una variación compleja de dicha magnitud eléctrica inducida, se deben a una variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de una pieza objeto de inspección.

45 De este modo, la optimización de la configuración geométrica de las bobinas se puede realizar específicamente teniendo en cuenta variaciones posibles de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección y dictando que estas variaciones sean detectables, al menos en un cierto margen de valores, por desplazamiento de una magnitud eléctrica compleja medible en cierta dirección predeterminada de un plano complejo de representación de esta magnitud eléctrica. Se puede, por lo tanto, fabricar de esta manera un cabezal de inspección que presente una mejor sensibilidad a las propiedades electromagnéticas de la pieza objeto de inspección, viéndose mejorada esta sensibilidad por las variaciones rectilíneas de la magnitud medida. No siendo, además, incompatible el criterio de optimización que se propone con aquellos propuestos en las patentes FR 2 881 827 B1, FR 2 904 694 B1 y FR 2 985 027 B1, se abre la posibilidad de fabricar un cabezal de inspección con sensibilidades múltiples.

50 De manera optativa, la optimización de la configuración geométrica de dicha al menos una bobina se realiza además con un criterio de minimización de la diferencia entre, por una parte, $\pm \pi/2$ y, por otra, el desfase entre dicha variación

compleja de la magnitud eléctrica debida a dicha variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección y otra variación compleja de la misma magnitud eléctrica debida a la presencia de un defecto que ha de detectarse en la pieza objeto de inspección y/o a una variación de distancia entre el cabezal de inspección y la pieza objeto de inspección. De este modo, se mejora la capacidad del cabezal de inspección para distinguir, por una parte, las variaciones de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética y, por otra, las variaciones de entrehierro y/o la presencia de un defecto.

También de manera optativa, la magnitud eléctrica compleja inducida es una fuerza electromotriz o una impedancia.

También de manera optativa, el cabezal de inspección incluye al menos dos bobinas y la optimización de la configuración geométrica de estas bobinas incluye la optimización de una disposición relativa de estas bobinas, tal como, por ejemplo, una distancia entre sus ejes.

También de manera optativa, la optimización de la configuración geométrica de dicha al menos una bobina incluye la optimización de dimensiones geométricas de cada bobina.

También de manera optativa, la configuración geométrica de dicha al menos una bobina del cabezal de inspección se inicializa previamente dictando al menos uno de los elementos del conjunto constituido a partir de un número de bobinas, de una asignación de función de emisión y/o de recepción por cada bobina y de la coaxialidad de todas las bobinas en caso de pluralidad de bobinas. En especial, si se dicta la coaxialidad de las bobinas, el sensor resultante será isótropo.

También de manera optativa, la configuración geométrica de dicha al menos una bobina del cabezal de inspección se optimiza haciendo variar al menos uno de los elementos del conjunto constituido a partir de la disposición relativa de las bobinas en caso de pluralidad de bobinas, de los diámetros internos y externos de cada bobina, de su número de espiras, de su grosor, de una distancia nominal con respecto a la pieza objeto de inspección y de la frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan por cada bobina.

De manera optativa, la optimización se realiza basándose en:

- una simulación de la configuración geométrica de dicha al menos una bobina del cabezal de inspección que permite evaluar dicha magnitud eléctrica compleja inducida y al menos su variación compleja en función de la variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección y
- una optimización, en particular una minimización, multidimensional no lineal y no restringida de tipo Nelder-Mead, aplicada al o los criterios de optimización.

También de manera optativa, la configuración geométrica de dicha al menos una bobina del cabezal de inspección se inicializa previamente dictando las siguientes imposiciones:

- el número de bobinas del cabezal de inspección se fija en tres, entre ellas una bobina de emisión y dos bobinas de recepción montadas en modo diferencial,
- las tres bobinas del cabezal de inspección son anulares y coaxiales,
- las dos bobinas de recepción del cabezal de inspección son, además, coplanarias.

También de manera optativa, la configuración geométrica de dicha al menos una bobina del cabezal de inspección se inicializa previamente dictando las siguientes imposiciones:

- el número de bobinas del cabezal de inspección se fija en dos, entre ellas una bobina de emisión y una bobina de recepción,
- estas dos bobinas son anulares, no coplanarias y no coaxiales.

La invención se comprenderá mejor con la ayuda de la descripción subsiguiente, dada únicamente a título de ejemplo y hecha con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

la figura 1 ilustra las sucesivas etapas de un procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault según un modo de realización de la invención, basándose en una configuración de cabezal de inspección con una bobina de emisión y una bobina de recepción,

las figuras 2 y 3 son diagramas que ilustran, en un plano complejo normalizado, la influencia de parámetros de configuración de bobinas sobre la verificación de un criterio de optimización del procedimiento de la figura 1,

- la figura 4 es un diagrama que ilustra, en un plano complejo normalizado, la detectabilidad de defectos con ayuda de un cabezal de inspección optimizado mediante la ejecución del procedimiento de la figura 1,

- la figura 5 es un diagrama que ilustra, en un plano complejo normalizado, la detectabilidad de variaciones de entrehierro con ayuda de un cabezal de inspección optimizado mediante la ejecución del procedimiento de la figura 1,

- las figuras 6 y 7 son diagramas que ilustran, en un plano complejo normalizado, resultados experimentales de optimización obtenidos mediante la ejecución del procedimiento de fabricación de la figura 1,

- la figura 8 ilustra el resultado de la ejecución del procedimiento de fabricación de la figura 1, basándose en una configuración de cabezal de inspección con una bobina de emisión y dos bobinas de recepción en modo diferencial,

- la figura 9 ilustra esquemáticamente el principio de diseño, gracias a la ejecución del procedimiento de fabricación de la figura 1, de un cabezal de inspección multielemento matricial.

Con carácter puramente ilustrativo, se presenta el procedimiento de fabricación de la figura 1 para el diseño particular de un cabezal de inspección 10 con dos bobinas no coaxiales, entre ellas una bobina con funciones de emisión y una bobina con funciones de recepción. Pero, como se verá en lo sucesivo, este procedimiento puede aplicarse en otras muchas configuraciones de cabezales de inspección.

Durante una primera etapa de inicialización 100, se dictan ciertos parámetros P_i de la configuración geométrica de las bobinas del cabezal de inspección 10. En el ejemplo de la figura 1 citado:

- el número de bobinas del cabezal de inspección 10 deseado se fija en dos, entre ellas una bobina de emisión E y una bobina de recepción R,

- estas dos bobinas E y R son anulares y dispuestas en planos diferentes paralelos.

De una manera general, la configuración geométrica de las bobinas del cabezal de inspección 10 se inicializa previamente durante esta etapa dictando un número de bobinas, una asignación de función de emisión y/o de recepción por cada bobina, una eventual coaxialidad de bobinas u otros parámetros restrictivos según la aplicación perseguida o el caso deseado. Así es como se puede contemplar un gran número de configuraciones de cabezales de inspección.

A continuación, durante una etapa de optimización 102, basándose en los parámetros P_i dictados en la etapa de inicialización 100, se inicializan otros parámetros P_f , llamados finales, que permiten una fabricación concreta del cabezal de inspección 10, y se modifican en el contexto de una optimización multidimensional y con criterios eventualmente múltiples de la configuración geométrica de las bobinas del cabezal de inspección 10.

Estos parámetros finales P_f incluyen en particular al menos parámetros de dimensiones geométricas de cada una de las bobinas definidas en la etapa de inicialización 100, pero también parámetros de disposiciones relativas de estas bobinas. Por lo tanto incluyen, por ejemplo, cuando las bobinas son anulares, los valores de los diámetros internos y externos de cada bobina, los valores de sus respectivos grosores y uno o varios valores de distancias entre ejes de bobinas (por ejemplo, la distancia d que separa los ejes de las bobinas E y R, en el ejemplo ilustrado en la figura 1). Los parámetros finales pueden incluir, además, el número de espiras en cada bobina, o el valor de la distancia nominal entre el cabezal de inspección 10 y la pieza objeto de inspección, cuando debe preverse una capa protectora y aislante entre las bobinas del cabezal de inspección y la superficie de la pieza objeto de inspección contra la cual está destinada a ponerse en contacto esta capa protectora y aislante. Pueden también incluir el valor de la frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan por las bobinas, aunque, como variante, la misma pueda venir dictada con la inicialización 100.

Algunos de los parámetros finales pueden estar relacionados entre sí. Por ejemplo, cuando, con la inicialización 100, se dictan dos bobinas *a priori* como coplanarias, estas no pueden solaparse y el diámetro externo de la más pequeña de estas dos bobinas es necesariamente inferior al diámetro interno de la otra. Otros parámetros pueden tener un margen de variación limitado, tales como los números de espiras.

En el ejemplo de la figura 1, los criterios con los cuales se realiza la optimización multidimensional de la configuración geométrica de las bobinas incluyen un primer criterio denotado por C1 de optimización del cumplimiento de una relación de proporcionalidad entre una variación de la parte imaginaria de una magnitud eléctrica compleja inducida en la bobina R con funciones de recepción y una variación de la parte real de esta magnitud eléctrica compleja, cuando estas variaciones, determinantes de una variación compleja de la magnitud eléctrica inducida, se deben a una variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de una pieza objeto de inspección. Este criterio C1 se puede calificar como criterio de maximización de la sensibilidad del cabezal de inspección 10 a las propiedades electromagnéticas de la pieza objeto de inspección. Permite apuntar a mantener una relación cuasi afin entre las partes real e imaginaria de la magnitud eléctrica inducida cuando varía la conductividad eléctrica y/o la permeabilidad magnética, lo cual mejora la posibilidad de determinar esta conductividad eléctrica y/o esta permeabilidad magnética.

Dado que el cabezal de inspección 10 ilustrado en la figura 1 es de funciones separadas de emisión y recepción, la magnitud eléctrica compleja inducida medible en la bobina R es, bien una fuerza electromotriz, o bien una transimpedancia, en función del aparato de medida de que se disponga. Cuando se tiene esta elección, por lo general es más ventajoso medir la fuerza electromotriz, habida cuenta de la simplicidad de los aparatos de medida de los que se puede disponer. Se puede utilizar en particular un aparato de detección síncrona que permite obtener sencillamente las partes real e imaginaria de la fuerza electromotriz.

Mediante la figura 2 se facilita una primera ilustración de la optimización del criterio C1, en la que un diagrama representa, en un plano complejo normalizado, diferentes curvas de posibles variaciones de la fuerza electromotriz inducida FEM entre los bornes de la bobina R de recepción del cabezal de inspección 10 en función de variaciones de la conductividad eléctrica de la pieza objeto de inspección, para una frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan por las bobinas E y R de 200 kHz. El eje de abscisas da el valor medido entre los bornes de la bobina R de la parte real de la fuerza electromotriz inducida FEM, denotada por $\text{Re}(\text{FEM})$, normalizado con un valor de referencia FEM_{air} obtenido en ausencia de pieza que inspeccionar, es decir, en vacío. Es sabido que tal valor de referencia FEM_{air} es escalar (puramente imaginario), por lo que puede servir de valor de normalización, a la vez para la parte real de FEM y para su parte imaginaria. El eje de ordenadas da, por lo tanto, el valor medido de la parte imaginaria de la fuerza electromotriz inducida FEM, denotada por $\text{Im}(\text{FEM})$, normalizado con el mismo valor de referencia FEM_{air} .

Se ilustran cuatro curvas A, B, C y D en la figura 2, correspondiendo cada curva a una configuración geométrica particular de las bobinas E y R. Cada curva ilustra, además, las variaciones de la fuerza electromotriz inducida FEM haciendo variar la conductividad eléctrica σ de la zona inspeccionada, de un valor límite inferior σ_1 a un valor límite superior $\sigma_2 \gg \sigma_1$. Más exactamente, en el ejemplo ilustrado, $\sigma_1 = 0,1 \text{ MS/m}$ y $\sigma_2 = 60 \text{ MS/m}$.

La curva A corresponde a una configuración según la cual las dos bobinas E y R son coaxiales ($d = 0$) y de diámetros internos y externos diferentes. La curva B corresponde a una configuración según la cual las dos bobinas E y R son coaxiales ($d = 0$) y de iguales diámetros internos y externos. La curva C corresponde a una configuración según la cual las dos bobinas E y R son de iguales diámetros internos y externos y desalineadas una distancia d igual a la mitad de su diámetro externo. Finalmente, la curva D corresponde a una configuración según la cual las dos bobinas E y R son de iguales diámetros internos y externos y desalineadas una distancia d igual a su diámetro externo.

La curva C se diferencia de las demás por ser la que mejor verifica el criterio de optimización C1. Efectivamente, presenta una buena linealidad en una gran parte del margen de los valores de σ , con lo que asegura una relación cuasi afín entre las partes real e imaginaria de la fuerza electromotriz. En particular, se muestra que solo pierde su linealidad para valores de σ inferiores a $0,5 \text{ MS/m}$, mientras que el margen máximo de conductividad de los materiales que generalmente se utilizan en inspección no destructiva por corrientes de Foucault suele variar entre $0,6 \text{ MS/m}$ (titanio) y 20 MS/m (aluminio). Esta linealidad ilustra la propiedad según la cual se cumple una relación de proporcionalidad entre toda variación de $\text{Im}(\text{FEM})$ y toda variación correspondiente de $\text{Re}(\text{FEM})$, cuando estas variaciones se deben a una variación de conductividad eléctrica dentro del margen de valores usuales. La constante de proporcionalidad viene dada por la pendiente de la porción de recta que forma la curva C en este margen de valores. Esta linealidad es interesante, ya que permite, entre otras cosas, estimar fácilmente los parámetros electromagnéticos del material.

Mediante la figura 3, se facilita una segunda ilustración de la optimización del criterio C1, en la que tres diagramas representan, en el plano complejo normalizado y para la configuración geométrica óptima de la curva C, otras tres curvas de posibles variaciones de la fuerza electromotriz inducida FEM entre los bornes de la bobina R de recepción del cabezal de inspección 10 en función de variaciones de la conductividad eléctrica de la pieza objeto de inspección entre $0,5 \text{ MS/m}$ y 60 MS/m , para tres valores de frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan por las bobinas E y R. Más exactamente, cada curva se representa con su regresión lineal para ilustrar su verificación del criterio C1. La primera curva C' se obtiene para una frecuencia eléctrica de 100 kHz y presenta un error cuadrático medio del $4,4 \%$ con respecto a su regresión lineal. La segunda curva C'' se obtiene para una frecuencia eléctrica de 200 kHz y presenta un error cuadrático medio del $1,2 \%$ con respecto a su regresión lineal. Finalmente, la tercera curva C''' se obtiene para una frecuencia eléctrica de 600 kHz y presenta un error cuadrático medio del $1,3 \%$ con respecto a su regresión lineal.

Se pone de relieve que, a partir de 200 kHz , el error cuadrático medio es muy pequeño y varía poco. Esto significa que es óptimo trabajar a altas frecuencias y que, por lo tanto, es posible estimar la conductividad eléctrica de piezas de escaso grosor.

La figura 4 es un diagrama que ilustra, en el plano complejo normalizado, la influencia de la presencia de defectos en la pieza objeto de inspección, en un margen de valores de conductividad eléctrica para el cual se ha optimizado el cabezal de inspección 10 de acuerdo con el criterio C1. En esta figura, la recta Δ representada en línea de puntos es la recta de las variaciones complejas de la fuerza electromotriz FEM en función de las variaciones de conductividad eléctrica entre σ_1 y σ_2 (por ejemplo, entre $0,5 \text{ MS/m}$ y 60 MS/m) cuando la pieza objeto de inspección no presenta defectos.

También en esta figura, siete porciones de curva d_1 a d_7 representan variaciones de la fuerza electromotriz FEM debidas a la presencia de un defecto en la pieza objeto de inspección para siete materiales de diferentes conductividades eléctricas. Por ejemplo, el material que da la porción de curva d_1 es aluminio 2024T3, el que da la porción de curva d_2 es acero inoxidable 304L, el que da la porción de curva d_3 es titanio TA6V y el que da la porción de curva d_4 es inconel 600 (marca registrada), materiales que son, los cuatro, conductores y no magnéticos. Asimismo, por ejemplo, el material que da la porción de curva d_5 es acero 32CVD13, el que da la porción de curva d_6 es acero 16NCD13 y el que da la porción de curva d_7 es acero inoxidable 15-5-ph, teniendo estos tres materiales conductividades más bien bajas en el margen de valores de que se trata y una permeabilidad magnética más o menos elevada.

Se pone de relieve que, en todos los casos, las porciones de curva significantes de la presencia de un defecto en la pieza objeto de inspección parten de la recta Δ y se alejan de ella según una dirección principal que se distingue muy claramente de aquella de la recta Δ , e incluso que hasta se aproxima a un ángulo recto con respecto a Δ . Esta propiedad es muy interesante, porque permite distinguir bien las variaciones complejas de la fuerza electromotriz inducida FEM debidas a variaciones de conductividad eléctrica de aquellas debidas a la presencia de un defecto. Resulta ser particularmente adecuada en el caso de una inspección de soldadura bimetálica con el fin de diferenciar bien los materiales determinantes de la soldadura y los defectos presentes en la soldadura.

Para acentuar esta propiedad, en el ejemplo de la figura 1, los criterios con los cuales se realiza la optimización multidimensional de la configuración geométrica de las bobinas pueden incluir además, optativamente, un segundo criterio, denotado por C2, de minimización de la diferencia entre, por una parte, $\pm \pi/2$ y, por otra, el desfase entre la variación compleja de la fuerza electromotriz FEM debida a la variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección y la variación compleja de esta misma fuerza electromotriz FEM debida a la presencia de un defecto que ha de detectarse en la pieza objeto de inspección.

El criterio C2 puede calificarse entonces como criterio de maximización de la sensibilidad del cabezal de inspección 10 a los defectos que han de detectarse en la pieza objeto de inspección, sin dejar de ser capaz de estimar la conductividad eléctrica, o de optimización de la capacidad del cabezal de inspección para discriminar defectos y variaciones electromagnéticas.

La figura 5 es un diagrama que ilustra, en el plano complejo normalizado, la influencia de la variación de entrehierro entre el cabezal de inspección 10 y la pieza objeto de inspección, en un margen de valores de conductividad eléctrica para el cual se ha optimizado el cabezal de inspección 10 de acuerdo con el criterio C1. En esta figura, la primera recta Δ_1 representada en línea de puntos es la recta de las variaciones complejas de la fuerza electromotriz FEM en función de las variaciones de conductividad eléctrica entre σ_1 y σ_2 (por ejemplo, entre 0,5 MS/m y 60 MS/m) para una primera distancia entre el cabezal de inspección 10 y la pieza objeto de inspección. La segunda recta Δ_2 representada en línea de puntos es la recta de las variaciones complejas de la fuerza electromotriz FEM en función de las variaciones de conductividad eléctrica entre σ_1 y σ_2 para una segunda distancia entre el cabezal de inspección 10 y la pieza objeto de inspección, siendo esta segunda distancia superior a la primera. La tercera recta Δ_3 representada en línea de puntos es la recta de las variaciones complejas de la fuerza electromotriz FEM en función de las variaciones de conductividad eléctrica entre σ_1 y σ_2 para una tercera distancia entre el cabezal de inspección 10 y la pieza objeto de inspección, siendo esta tercera distancia superior a la segunda.

Se pone de relieve que la variación de entrehierro origina una traslación de la recta de las variaciones de la fuerza electromotriz inducida FEM debida a las variaciones electromagnéticas. Además, puede apreciarse que esta traslación se hace en una dirección principal que se distingue muy claramente de aquella de la recta Δ , e incluso que hasta se aproxima a un ángulo recto con respecto a Δ . Esta propiedad también es muy interesante, porque permite distinguir bien las variaciones complejas de la fuerza electromotriz inducida FEM debidas a variaciones de conductividad eléctrica de aquellas debidas a variaciones de entrehierro. Debido a la traslación medible de la recta Δ en Δ_1 , Δ_2 o Δ_3 cuando aumenta el entrehierro, este puede estimarse. Pues bien, se trata de un parámetro que es interesante conocer ya que permite medir el grosor de un revestimiento, por ejemplo.

Para acentuar esta propiedad, en el ejemplo de la figura 1, los criterios con los cuales se realiza la optimización multidimensional de la configuración geométrica de las bobinas pueden incluir además, optativamente, un tercer criterio, denotado por C3, de minimización de la diferencia entre, por una parte, $\pm \pi/2$ y, por otra, el desfase entre la variación compleja de la fuerza electromotriz FEM debida a la variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección y la variación compleja de esta misma fuerza electromotriz FEM debida a una variación de distancia entre el cabezal de inspección y la pieza objeto de inspección, por ejemplo, cuando se desplaza el cabezal de inspección 10 con respecto a la pieza.

El criterio C3 puede calificarse entonces como criterio de optimización de la sensibilidad del cabezal de inspección 10 a las variaciones de entrehierro, sin dejar de ser capaz de estimar la conductividad eléctrica, o de optimización de la capacidad del cabezal de inspección para discriminar variaciones de entrehierro y variaciones electromagnéticas.

En el ejemplo de la figura 1, se utilizan los tres criterios C1, C2 y C3 en la etapa de optimización 102. Pero, como variante, y sin dejar de estar dentro del ámbito de la invención, podría(n) tenerse en cuenta el solo criterio C1 o los solos criterios C1 y C2, o C1 y C3.

5 También se hace notar que las variaciones de conductividad eléctrica debidas a las variaciones de entrehierro son discriminables fácilmente de aquellas debidas a la presencia de un defecto, al ser las curvas obtenidas en presencia de un defecto muy características y diferentes de las traslaciones obtenidas al aumentar o disminuir el entrehierro.

10 La etapa de optimización 102, multidimensional (por la presencia de varios parámetros finales P_f para optimizar), a priori no lineal, no restringida y de criterios múltiples (por la consideración de C1, o C1 y C2, o C1 y C3, o C1 y C2 y C3), puede ejecutarse con ayuda de diferentes algoritmos conocidos. De manera práctica, formalizando esta optimización en forma de una función multidimensional, no lineal y no restringida para minimizar, puede ponerse en práctica el algoritmo de Nelder-Mead en esta etapa del procedimiento de fabricación. Como variante, también se pueden poner en práctica algoritmos genéricos menos sensibles a los mínimos locales.

15 Durante esta optimización de los parámetros finales P_f para atenerse a los criterios adoptados, ventajosamente se simula la configuración geométrica de las bobinas para evaluar la fuerza electromotriz FEM y sus variaciones en función de las propiedades electromagnéticas de la pieza objeto de inspección. La simulación se hace, por ejemplo, con ayuda del soporte lógico de simulación de inspección no destructiva conocido con el nombre de CIVA (marca registrada), o de cualquier otro soporte lógico de simulación, en particular por elementos finitos.

La etapa de optimización 102 viene seguida de una etapa 104 de selección de los parámetros finales P_f que realizan esta optimización.

25 Finalmente, durante una etapa final 106, se fabrica el cabezal de inspección 10 cumpliendo la configuración geométrica de las bobinas definida por los parámetros iniciales P_i y finales P_f .

30 Como se ilustra en la parte inferior de la figura 1, en sección y en vista desde arriba, el cabezal de inspección 10 obtenido al término de la etapa de fabricación 106 está realizado concretamente, por ejemplo, en una película flexible de poliimida de 150 μm de grosor que presenta cuatro capas L_1 , L_2 , L_3 y L_4 . El interés de una película fina y flexible de este tipo está en permitir que el cabezal de inspección 10 inspeccione piezas que presentan considerables radios de curvatura amoldándose a su forma.

35 El grosor de las dos bobinas E y R es, por ejemplo, igual al grosor de una pista de cobre, esto es, para este ejemplo, 9 μm . Para la bobina con funciones de emisión E, el circuito de emisión en el que queda integrada, así como sus espiras, están materializados por un hilo de cobre W_E . Para la bobina con funciones de recepción R, el circuito de recepción en el que queda integrada, así como sus espiras, están materializados por un hilo de cobre W_R .

40 Sobre la capa inferior L_1 , el hilo de cobre W_R se enrolla en un sentido predeterminado a partir del diámetro externo de la bobina R hasta su diámetro interno, determinando así la bobina R. A continuación, asciende a lo largo del eje de la bobina R hacia la capa L_2 , mediante un orificio pasante. Esta capa L_2 desempeña sencillamente una función de encaminamiento del hilo de cobre W_R para la formación del circuito de recepción. Sobre la capa L_3 , el hilo de cobre W_E se enrolla en un sentido predeterminado a partir del diámetro externo de la bobina E hasta su diámetro interno, determinando así la bobina E. A continuación, asciende a lo largo del eje de la bobina E hacia la capa superior L_4 , mediante un orificio pasante. Esta capa superior L_4 desempeña sencillamente una función de encaminamiento del hilo de cobre W_E para la formación del circuito de emisión.

En un ámbito experimental, se han añadido además las siguientes imposiciones:

- 50 • el número de espiras de las dos bobinas debe ser máximo para aumentar la sensibilidad y, por motivos tecnológicos, se fija en 160 μm la resolución de las espiras (ancho pista de cobre + ancho aislante entre espiras),
- los diámetros internos y externos de las bobinas se adecúan para tener un número entero de espiras,
- 55 • se utiliza una cinta adhesiva de poliimida autoadhesiva de 65 μm de grosor para proteger la cara del cabezal de inspección 10 en contacto con la pieza objeto de inspección,
- la frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan por las bobinas se fija inicialmente en 1 MHz, parámetro este que también se ajusta en la etapa de optimización 102.

60 Además, con miras a que el cabezal de inspección 10 pueda ser utilizado para detectar zonas de quemadura de fresado en mecanizados, se puede dictar un diámetro externo máximo de bobina con arreglo al diámetro de la fresa. Efectivamente, estas zonas de fragilidad local se identifican por una variación de conductividad eléctrica cuando una fresa permanece demasiado tiempo en un mismo lugar.

De acuerdo con el criterio C1, y eventualmente con los criterios C2 o C3, se obtiene, por ejemplo, en la etapa 104, la siguiente configuración geométrica:

Bobina de emisión E:

- diámetro interno = 9 mm,
- diámetro externo = 10 mm,
- altura = 0,01 mm,
- número de espiras = 4.

Bobina de recepción R:

- diámetro interno = 9 mm,
- diámetro externo = 10 mm,
- altura = 0,01 mm,
- número de espiras = 4.

Distancia d entre los ejes de las dos bobinas E y R: 5 mm.

Frecuencia eléctrica optimizada: cercana a 1 MHz.

Para esta configuración, la figura 6 ilustra resultados experimentales obtenidos con varios materiales de diferentes conductividades eléctricas conocidas. En esta figura, la recta Δ representa la regresión lineal teórica de las variaciones de la fuerza electromotriz inducida FEM resultante de estas variaciones de conductividades eléctricas. Los materiales que se han empleado son: el titanio LT31 de conductividad eléctrica igual a 0,6124 MS/m (referencia M₁ en la figura 6), la manganina de conductividad eléctrica igual a 2,449 MS/m (referencia M₂), la alpaca de conductividad eléctrica igual a 3,953 MS/m (referencia M₃), el bronce de conductividad eléctrica igual a 8,704 MS/m (referencia M₄), el oro nórdico de conductividad eléctrica igual a 9,67 MS/m (referencia M₅), el Messing de conductividad eléctrica igual a 14,35 MS/m (referencia M₆), el aluminio 2.024/T3.511 de conductividad eléctrica igual a 16,93 MS/m (referencia M₇), el aluminio 7.175/T7.351 de conductividad eléctrica igual a 22,8 MS/m (referencia M₈), el AlMgSi F32 de conductividad eléctrica igual a 27,71 MS/m (referencia M₉), el aluminio 99,5 de conductividad eléctrica igual a 34,04 MS/m (referencia M₁₀), el cobre de conductividad eléctrica igual a 58,8 MS/m (referencia M₁₁). Está claro que todos los valores de fuerza electromotriz inducida medidos experimentalmente son muy cercanos a la recta Δ . La relación afín así obtenida es muy ventajosa, ya que permite establecer experimentalmente una relación simple entre la fuerza electromotriz inducida FEM medida y un valor correspondiente de conductividad eléctrica.

También se puede demostrar experimentalmente que, mediante el mismo método, es posible obtener una relación afín simple entre las variaciones de fuerza electromotriz inducida (o de impedancia) y variaciones de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección.

Así, la figura 7 ilustra resultados experimentales obtenidos con varios materiales de diferentes porcentajes de ferrita conocidos. En menor medida, los valores de fuerza electromotriz inducida medidos experimentalmente son cercanos a la recta Δ , lo que permite establecer también experimentalmente una relación afín simple entre la fuerza electromotriz inducida FEM medida y un porcentaje de ferrita correspondiente. Pues bien, es sabido que el porcentaje de ferrita está relacionado con la permeabilidad magnética, aun si la relación no se conoce de manera precisa. Es sabido, por ejemplo, que la permeabilidad magnética aumenta cuando aumenta el porcentaje de ferrita. La relación cuasi afín entre las variaciones de permeabilidad magnética y las de la fuerza electromotriz inducida FEM queda, pues, establecida con estos resultados experimentales.

El procedimiento de fabricación de la figura 1 se ha presentado para el diseño de un cabezal de inspección 10 de dos bobinas no coaxiales, entre ellas una bobina con funciones de emisión y una bobina con funciones de recepción. Pero también es de aplicación, por ejemplo, para el diseño de un cabezal de inspección 10' de tres bobinas coaxiales, entre ellas una bobina con funciones de emisión y dos bobinas con funciones de recepción montadas en modo diferencial. El objeto de la figura 8 es el que ilustra esquemáticamente tal configuración de cabezal de inspección 10'.

El interés de esta configuración está en que presenta un escaso acoplamiento en ausencia de defectos y que permite obtener una respuesta isótropa.

Durante la primera etapa de inicialización 100, se dictan ciertos parámetros P_i de la configuración geométrica de las bobinas del cabezal de inspección 10'. En el ejemplo de la figura 8:

• el número de bobinas del cabezal de inspección 10 deseado se fija en tres, entre ellas una bobina de emisión E y dos bobinas de recepción R^+ y R^- montadas en modo diferencial,

- 5 • las tres bobinas E, R^+ y R^- son anulares y coaxiales,
- las dos bobinas de recepción R^+ y R^- son además coplanarias.

10 Como se ilustra en la parte derecha de la figura 8, en sección y en vista desde arriba, el cabezal de inspección 10' obtenido al término de la etapa de fabricación 106 está realizado concretamente en una película flexible de poliimida que presenta cuatro capas L_1 , L_2 , L_3 y L_4 . El grosor de las tres bobinas E, R^+ y R^- es, por ejemplo, igual al grosor de una pista de cobre, esto es, para este ejemplo, 9 μm . Para la bobina con funciones de emisión E, el circuito de emisión en el que queda integrada, así como sus espiras, están materializados por un hilo de cobre W_E . Para las dos bobinas con funciones de recepción R^+ y R^- , el circuito de recepción en el que están montadas en modo diferencial, así como sus espiras, están materializados por un hilo de cobre W_R .

20 Sobre la capa inferior L_1 , el hilo de cobre W_R se enrolla en un primer sentido a partir del diámetro externo de la bobina R^- hasta su diámetro interno, determinando así la bobina R^- , y luego se enrolla en un segundo sentido, opuesto al primero, a partir del diámetro externo de la bobina R^+ hasta su diámetro interno, determinando así la bobina R^+ . A continuación, asciende a lo largo del eje común de las dos bobinas R^+ y R^- hacia la capa L_2 , mediante un orificio pasante. Esta capa L_2 desempeña sencillamente una función de encaminamiento del hilo de cobre W_R para la formación del circuito de recepción. Sobre la capa L_3 , el hilo de cobre W_E se enrolla en un sentido predeterminado a partir del diámetro externo de la bobina E hasta su diámetro interno, determinando así la bobina E. A continuación, asciende a lo largo del eje de la bobina E, que es también común a las dos bobinas R^+ y R^- , hacia la capa superior L_4 , mediante un orificio pasante. Esta capa superior L_4 desempeña sencillamente una función de encaminamiento del hilo de cobre W_E para la formación del circuito de emisión.

25 De acuerdo con el criterio C1, y eventualmente con los criterios C2 o C3, se obtiene, por ejemplo, en la etapa 104, la siguiente configuración geométrica:

30 Bobina de emisión E:

- diámetro interno = 1,6 mm,
- 35 • diámetro externo = 6,3 mm,
- altura = 0,005 mm,
- número de espiras = 19.

40 Bobina de recepción R^+ :

- diámetro interno = 1,613 mm,
- 45 • diámetro externo = 3,5 mm,
- altura = 0,005 mm,
- número de espiras = 7.

50 Bobina de recepción R^- :

- diámetro interno = 4,364 mm,
- 55 • diámetro externo = 5,484 mm,
- altura = 0,005 mm,
- número de espiras = 4.

60 Frecuencia eléctrica optimizada: cercana a 1 MHz.

Siendo los parámetros P_i de la configuración geométrica ilustrada en la figura 8 los mismos que aquellos de la configuración geométrica ilustrada en la figura 1 de la patente FR 2 985 027 B1, se han comparado los dos cabezales de inspección optimizados obtenidos desde el punto de vista del error cuadrático medio con respecto a las regresiones lineales de sus curvas simuladas de las variaciones de la fuerza electromotriz inducida FEM en función de las

variaciones electromagnéticas de la pieza objeto de inspección. El cabezal de inspección optimizado de la figura 8 presenta un error cuadrático medio del 0,23 %, mientras que el de la patente FR 2 985 027 B1 está en el 3,78 %. Por lo tanto, se mide un claro mejoramiento de la optimización a la vista del criterio C1 de la presente invención.

5

De una manera general, el procedimiento de fabricación de la figura 1 es de aplicación para el diseño de cabezales de inspección que presentan configuraciones geométricas muy diversas:

- 10 • configuraciones con una bobina de emisión y una o dos bobinas de recepción, como se ha visto con referencia a las figuras 1 y 8, pero en las que las bobinas pueden estar ordenadas de diferentes maneras sobre las capas del soporte, coplanarias o no, de diferentes grosores, etc.,
- 15 • configuraciones con dos bobinas de emisión en modo diferencial y una bobina de recepción, en las que las bobinas también pueden estar ordenadas de diferentes maneras sobre las capas del soporte, coplanarias o no, de diferentes grosores, etc.,
- 20 • configuraciones con una o dos bobinas con funciones comunes de emisión/recepción, en las que las bobinas pueden estar ordenadas de diferentes maneras sobre las capas del soporte, coplanarias o no, de diferentes grosores, etc.,
- configuraciones con un número de bobinas superior a tres.

25 También de una manera general, el procedimiento de fabricación anteriormente descrito conviene para cabezales de inspección cuyas bobinas son de tipos tan variados como de alambre, impresas o grabadas sobre soportes flexibles (poliimidas mono o multicapa) o rígidos (policlorobifenilos). Por otro lado, las bobinas emisoras y receptoras no necesariamente tienen las mismas características geométricas. Pueden ser, además, de forma compleja, tal como una forma poligonal, ovalada o de espiras arbitrarias, etc.

30 También pueden ir integrados sobre el soporte componentes electrónicos tales como amplificadores, multiplexores, demoduladores u otros.

35 Un núcleo de ferrita también puede ir dispuesto al menos parcialmente sobre una o varias de las bobinas del cabezal de inspección o recubrir incluso el conjunto de las bobinas. Más generalmente, un blindaje magnético puede estar integrado en el cabezal de inspección, tal como un núcleo de ferrita o una cinta magnética flexible.

40 Por otro lado, como se ilustra en la figura 9, el patrón elemental, ilustrado en las figuras 1 y 8 y obtenido mediante la ejecución del procedimiento de fabricación anteriormente descrito, puede repetirse para la fabricación de un cabezal de inspección multielemento. Además, en una configuración con funciones separadas de emisión y de recepción, como es el caso del ejemplo de las figuras 1 y 8, es posible un arreglo matricial con conexión de los elementos en filas (E1, E2) y en columnas (R1, R2, R3, R4) según el mismo procedimiento que el que se pone en práctica y describe en la patente francesa con número de publicación FR 2 904 693 B1. Se puede contemplar entonces diversificar un sensor que incluye un cabezal de inspección de este tipo como generador de imágenes bidimensional estático, permitiendo la coaxialidad de las bobinas de la figura 8, además, reducir las zonas de sombra (es decir, zonas con imposibilidad de detección de defectos).

45 En resumen, resulta claro que un procedimiento de fabricación tal como el descrito anteriormente permite diseñar cabezales de inspección de sensores de inspección no destructiva con corrientes de Foucault que presentan las siguientes ventajas:

- 50 • gran sensibilidad a las variaciones electromagnéticas en la pieza objeto de inspección haciendo lo más rectilínea posible en el plano complejo la respuesta medida, sin dejar de ser sensible a los defectos y a las variaciones de entrehierro,
- 55 • isotropía cuando se dicta una coaxialidad de las bobinas,
- fácil realización sobre película flexible de poliimida, en un mínimo de dos capas para los cabezales de inspección con funciones separadas de emisión y recepción, o un mínimo de dos capas para los cabezales de inspección con funciones comunes de emisión/recepción,
- 60 • posibilidad de conexión simple en matriz para la realización de generadores de imágenes con un modo de conexión de las bobinas de emisión por fila y de las bobinas de recepción, obteniéndose entonces la imagen mediante un desplazamiento según un eje del sensor,

65

- gracias a la reducida ocupación de espacio de la configuración geométrica del patrón elemental, posibilidad de diseñar sensores de tipo generador de imágenes bidimensional estático que minimiza las zonas de sombra, realizables en película flexible de poliimida de múltiples capas.

5 Son abundantes las aplicaciones y comprenden en particular:

- la estimación de parámetros electromagnéticos de materiales, incluso en presencia de variaciones de entrehierro,

10 • la detección de defectos en materiales no homogéneos,

- la estimación de grosores de revestimientos por medición de entrehierro en materiales no homogéneos,

15 • la detección de zonas particulares en piezas donde los parámetros electromagnéticos son diferentes (zona de quemadura, torsión...),

- la determinación conjunta de la presencia de defectos y de los parámetros electromagnéticos de una pieza inspeccionada,

20 • la determinación conjunta de la presencia del grosor de revestimiento y de los parámetros electromagnéticos de una pieza inspeccionada,

- etc.

25 Se hace notar, por otro lado, que la invención no está limitada a los modos de realización descritos anteriormente. Resultará evidente para un experto en la materia que los modos de realización antes descritos son susceptibles de diversas modificaciones, a tenor de la enseñanza que se le acaba de dar a conocer. En las reivindicaciones que siguen, los términos empleados no deberán interpretarse en un sentido limitativo de las reivindicaciones a los modos de realización expuestos en la presente descripción, sino que deberán interpretarse para englobar todos los
30 equivalentes que las reivindicaciones están encaminadas a cubrir por su formulación y cuya previsión está al alcance de un experto en la materia aplicando sus conocimientos generales a la puesta en práctica de la enseñanza que se le acaba de dar a conocer.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') de un sensor de inspección no destructiva con corrientes de Foucault, incluyendo este cabezal de inspección al menos una bobina (E, R; E, R⁺, R⁻), entre ellas al menos una bobina con funciones de emisión y al menos una bobina con funciones de recepción, que incluye las siguientes etapas:
 - optimización (102) de una configuración geométrica (P_i, P_f) de dicha al menos una bobina (E, R; E, R⁺, R⁻) del cabezal de inspección (10; 10') basándose en al menos un criterio de optimización predeterminado,
 - fabricación (106) del cabezal de inspección (10; 10') cumpliendo la configuración geométrica (P_i, P_f) de dicha al menos una bobina (E, R; E, R⁺, R⁻) que materializa esta optimización (102),

caracterizado por que dicho al menos un criterio de optimización predeterminado incluye un criterio (C1) de optimización del cumplimiento de una relación de proporcionalidad entre una variación de la parte imaginaria de una magnitud eléctrica compleja inducida en dicha al menos una bobina con funciones de recepción (R; R⁺, R⁻) y una variación de la parte real de esa magnitud eléctrica compleja, cuando estas variaciones, determinantes de una variación compleja de dicha magnitud eléctrica inducida, se deben a una variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de una pieza objeto de inspección.
2. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') según la reivindicación 1, en dicho al menos un criterio de optimización predeterminado además incluye un criterio (C2, C3) de minimización de la diferencia entre, por una parte, $\pm \pi/2$ y, por otra, el desfase entre dicha variación compleja de la magnitud eléctrica debida a dicha variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección y otra variación compleja de la misma magnitud eléctrica debida a la presencia de un defecto que ha de detectarse en la pieza objeto de inspección y/o a una variación de distancia entre el cabezal de inspección (10; 10') y la pieza objeto de inspección.
3. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') según la reivindicación 1 o 2, en donde la magnitud eléctrica compleja inducida es una fuerza electromotriz o una impedancia.
4. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde el cabezal de inspección (10; 10') incluye al menos dos bobinas (E, R; E, R⁺, R⁻) y la optimización de la configuración geométrica de estas bobinas incluye la optimización de una disposición relativa de estas bobinas.
5. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde la optimización de la configuración geométrica de dicha al menos una bobina (E, R; E, R⁺, R⁻) incluye la optimización de dimensiones geométricas (P_f) de cada bobina.
6. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde la configuración geométrica (P_i, P_f) de dicha al menos una bobina (E, R; E, R⁺, R⁻) del cabezal de inspección (10; 10') se inicializa (100) previamente dictando al menos uno (P_i) de los elementos del conjunto constituido a partir de un número de bobinas, de una asignación de función de emisión y/o de recepción por cada bobina y de la coaxialidad de todas las bobinas en caso de pluralidad de bobinas.
7. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde la configuración geométrica (P_i, P_f) de dicha al menos una bobina (E, R; E, R⁺, R⁻) del cabezal de inspección (10; 10') se optimiza (102) haciendo variar al menos uno (P_f) de los elementos del conjunto constituido a partir de la disposición relativa de las bobinas en caso de pluralidad de bobinas, de los diámetros internos y externos de cada bobina, de su número de espiras, de su grosor, de una distancia nominal con respecto a la pieza objeto de inspección y de la frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan por cada bobina.
8. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10; 10') según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde la optimización (102) se realiza basándose en:
 - una simulación de la configuración geométrica (P_i, P_f) de dicha al menos una bobina (E, R; E, R⁺, R⁻) del cabezal de inspección (10; 10') que permite evaluar dicha magnitud eléctrica compleja inducida y al menos su variación compleja en función de la variación de conductividad eléctrica y/o de permeabilidad magnética de la pieza objeto de inspección, y
 - una optimización, en particular una minimización, multidimensional no lineal y no restringida de tipo Nelder-Mead, aplicada al o los criterios de optimización (C1, C2, C3).

9. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10') según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde la configuración geométrica (P_i , P_f) de dicha al menos una bobina (E, R^+ , R) del cabezal de inspección (10') se inicializa previamente dictando las siguientes imposiciones:
- 5 -el número de bobinas del cabezal de inspección se fija en tres, entre ellas una bobina de emisión (E) y dos bobinas de recepción (R^+ , R) montadas en modo diferencial,
 -las tres bobinas (E, R^+ , R) del cabezal de inspección (10') son anulares y coaxiales,
 -las dos bobinas de recepción (R^+ , R) del cabezal de inspección (10') son, además, coplanarias.
- 10 10. Procedimiento de fabricación de un cabezal de inspección (10) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde la configuración geométrica (P_i , P_f) de dicha al menos una bobina (E, R) del cabezal de inspección (10) se inicializa previamente dictando las siguientes imposiciones:
- 15 -el número de bobinas del cabezal de inspección se fija en dos, entre ellas una bobina de emisión (E) y una bobina de recepción (R),
 -estas dos bobinas (E, R) son anulares, no coplanarias y no coaxiales.

Figura 1

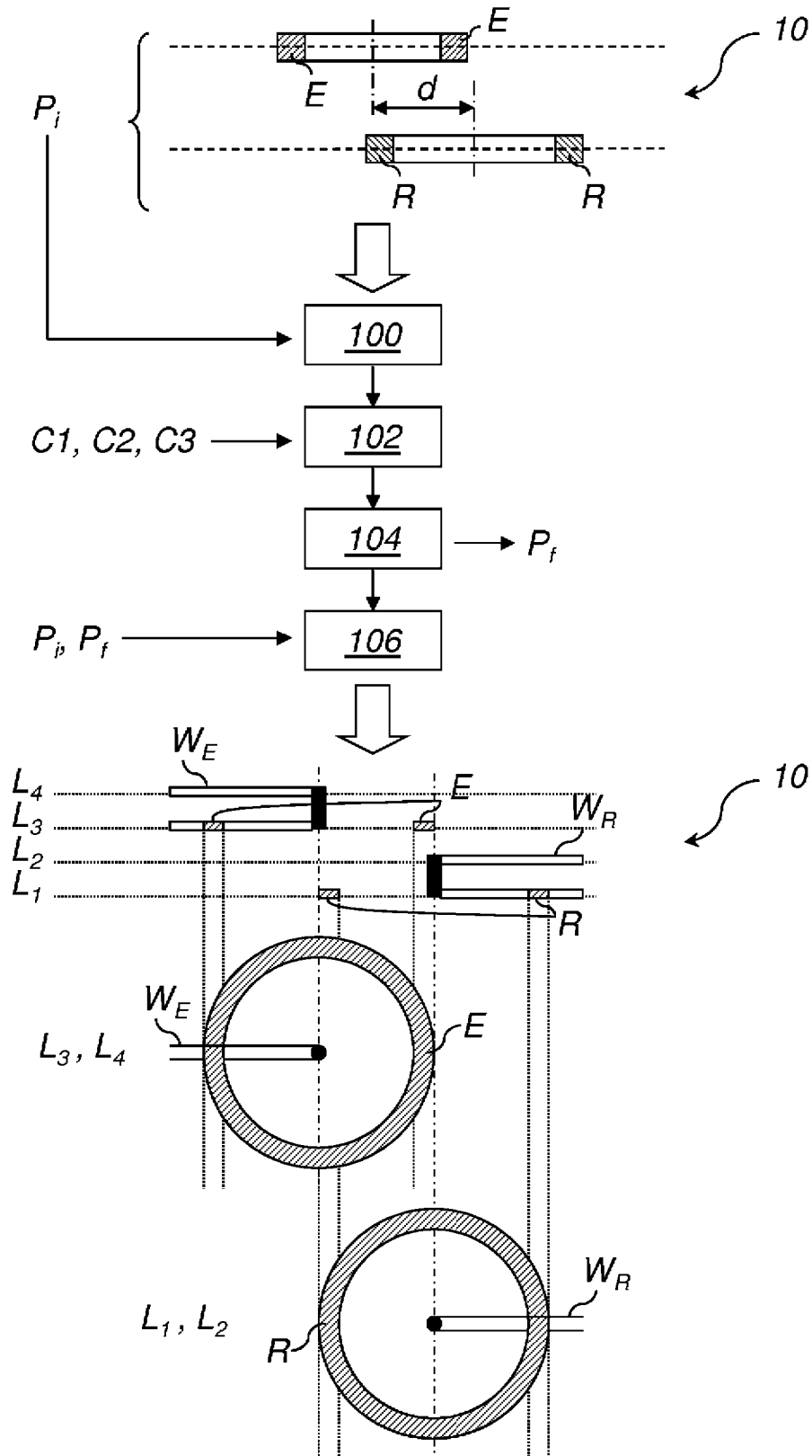


Figura 2

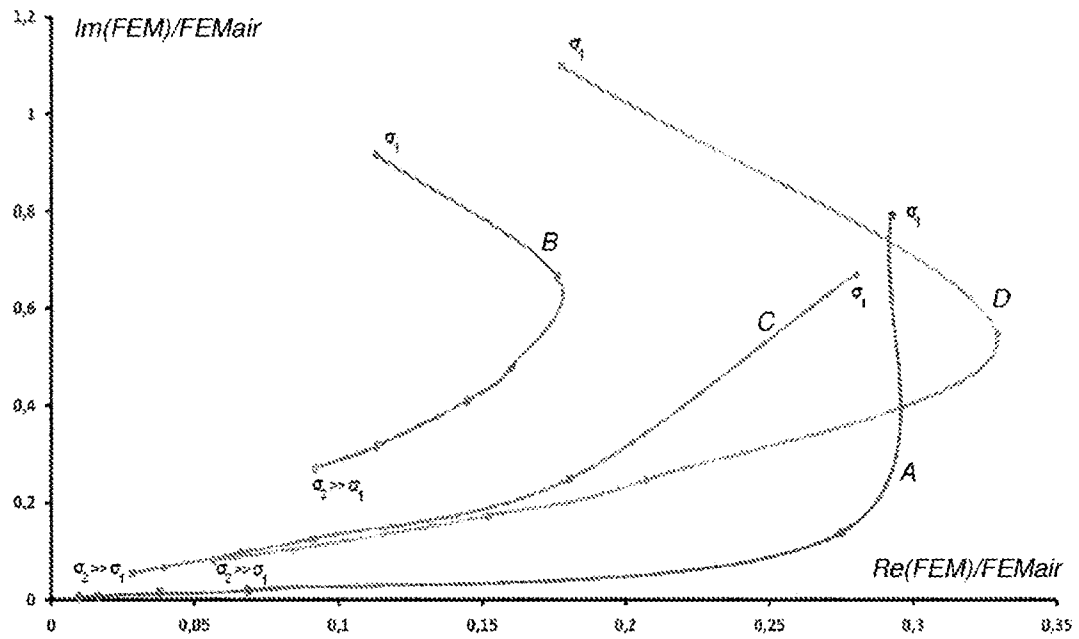


Figura 3

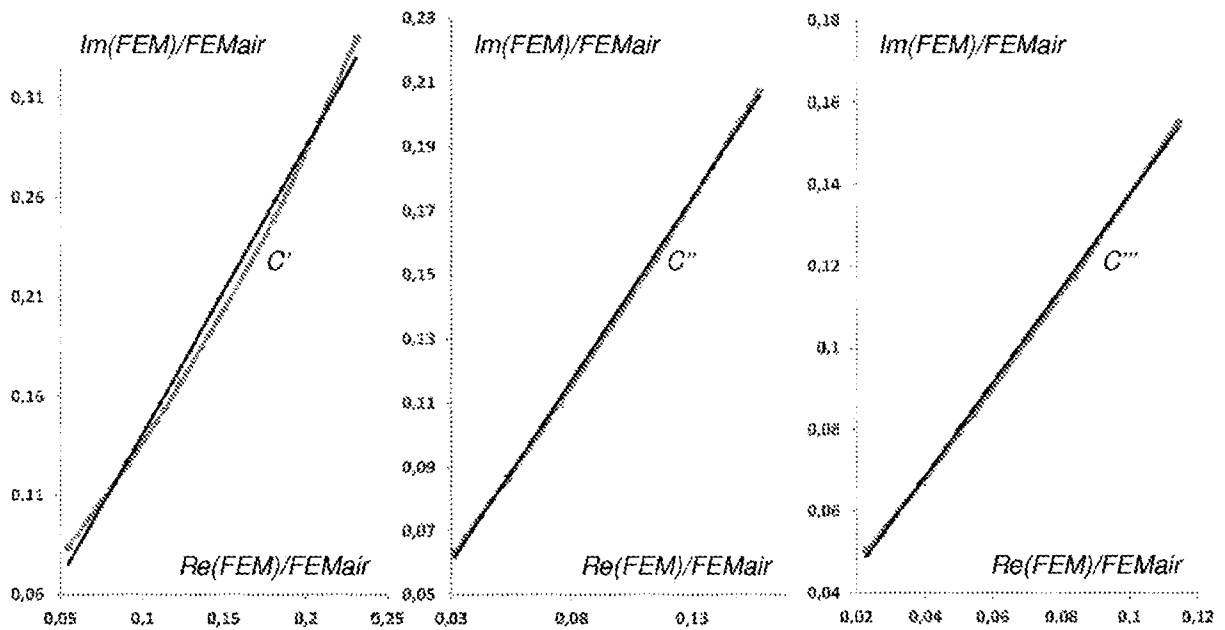


Figura 4

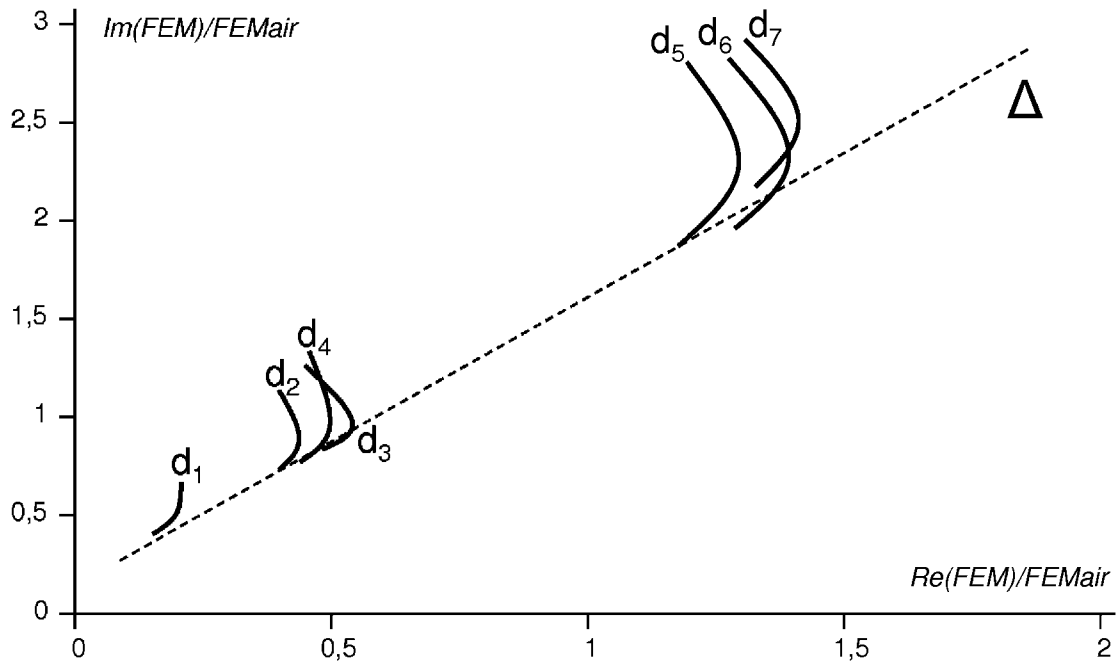


Figura 5

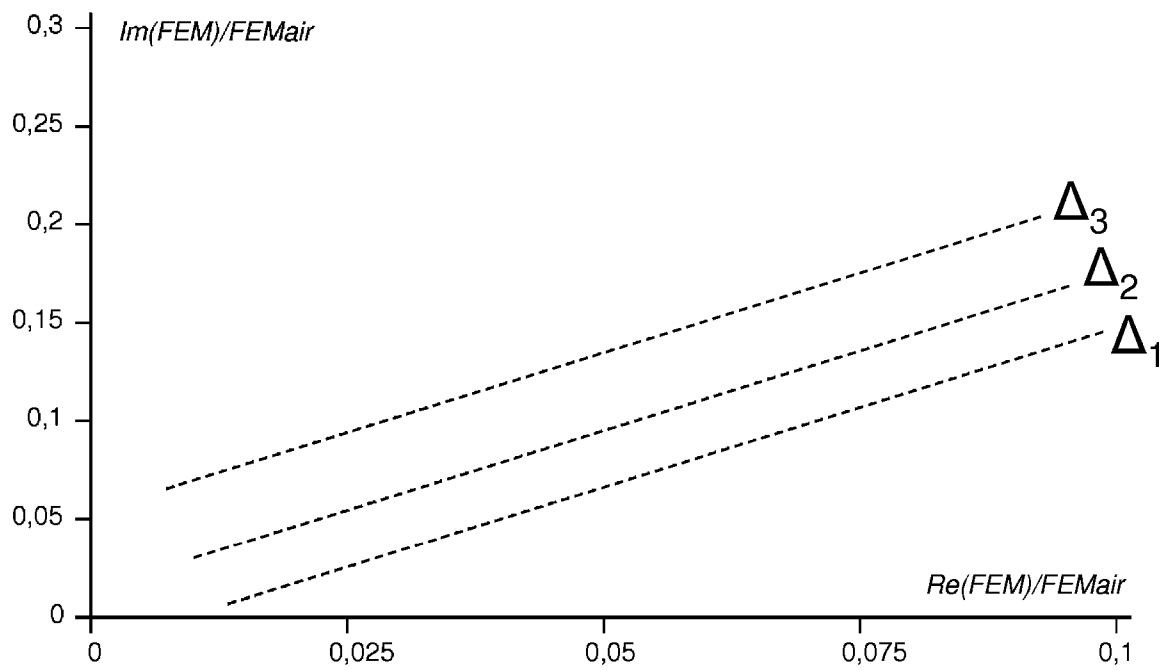


Figura 6

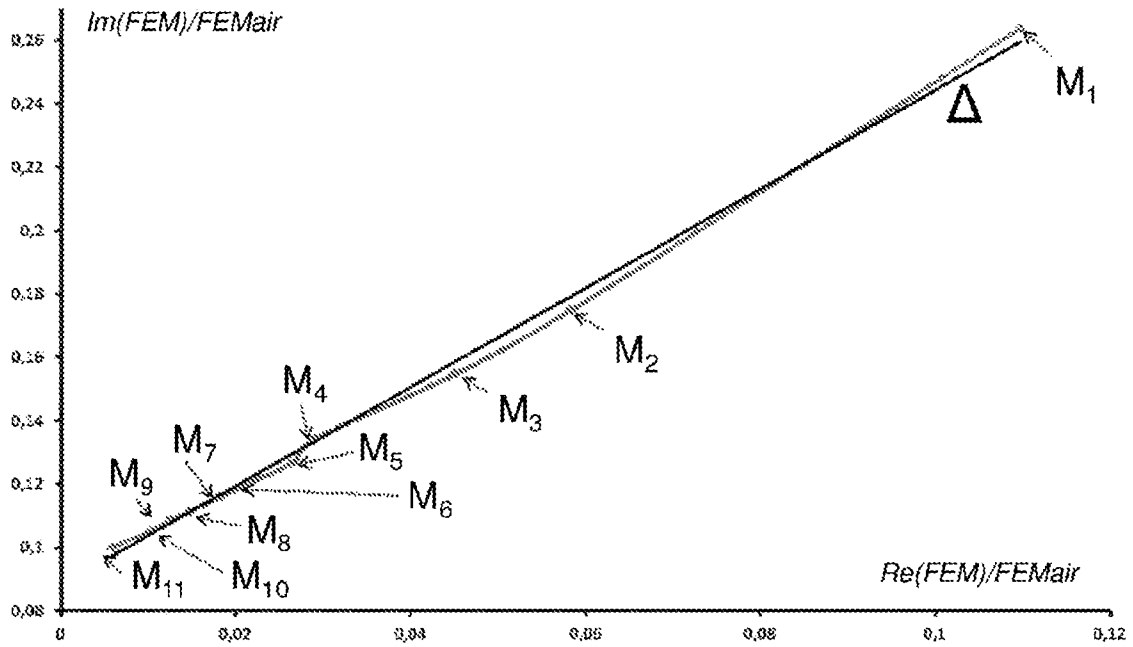


Figura 7

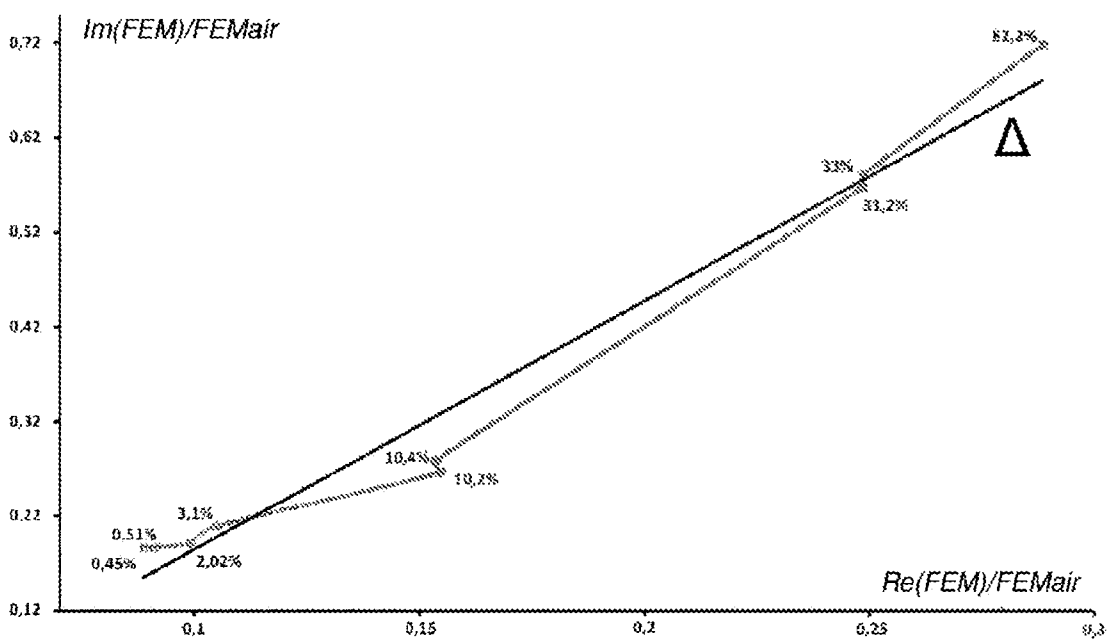


Figura 8

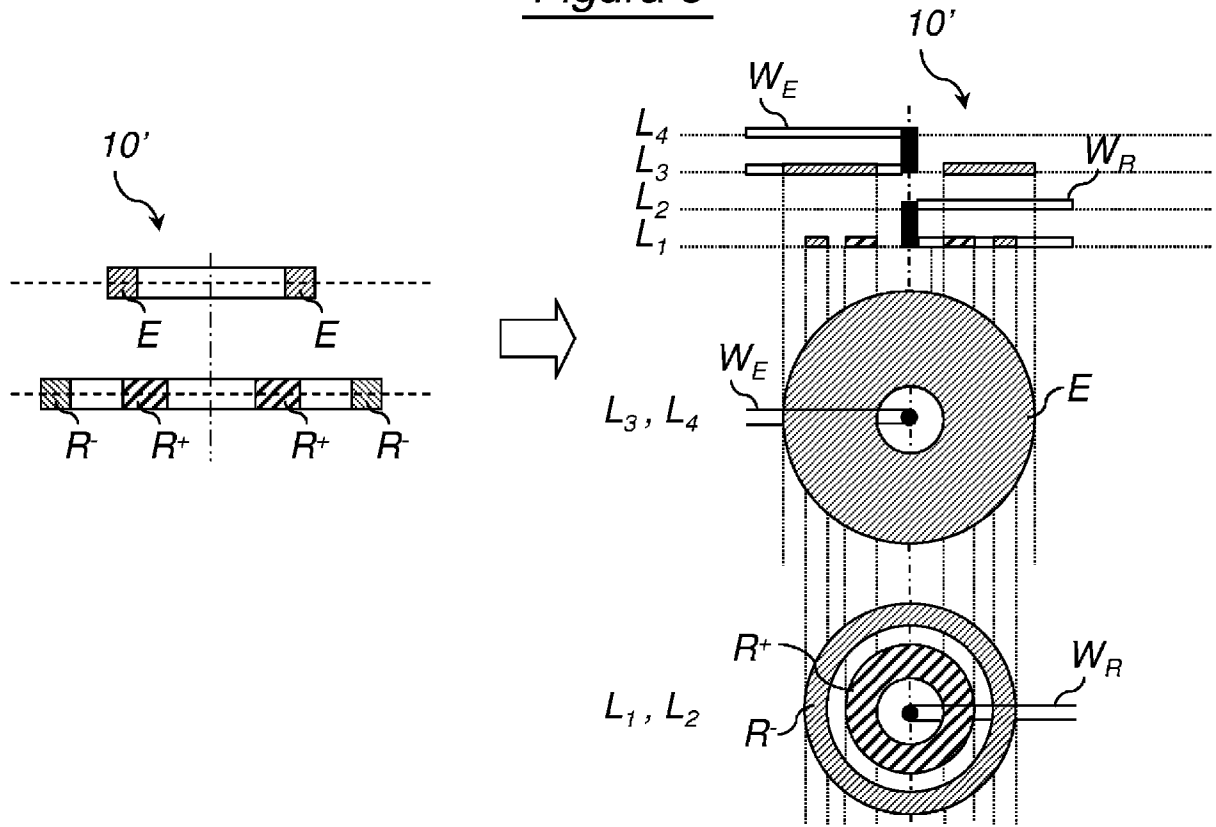


Figura 9

