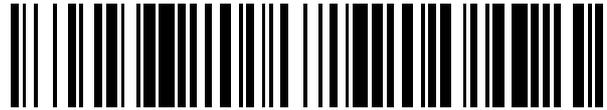


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 563 052**

51 Int. Cl.:

**G01N 27/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.12.2012 E 12812291 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.11.2015 EP 2795302**

54 Título: **Procedimiento de fabricación de una cabeza de control de un sensor de control no destructivo con corrientes de Foucault**

30 Prioridad:

**22.12.2011 FR 1162342**

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

**10.03.2016**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**DECITRE, JEAN-MARC**

74 Agente/Representante:

**AZNÁREZ URBIETA, Pablo**

**ES 2 563 052 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 una cabeza de control de un sensor de control no destructivo con corrientes de Foucault**

- 5 La presente invención se refiere a un procedimiento de fabricación de una cabeza de control de un sensor de control no destructivo por corrientes de Foucault.

Un sensor de control no destructivo de este tipo utiliza la propiedad electromagnética de las corrientes de Foucault para detectar defectos tales como cortes, fisuras o corrosiones en estructuras conductoras de poco espesor, no necesariamente planas, como piezas metálicas aeronáuticas o nucleares. Por ejemplo, esta  
10 tecnología permite inspeccionar los tubos de los generadores de vapor en centrales nucleares.

En general, una cabeza de control de tal sensor comprende al menos una bobina con función de emisión alimentada con corriente alterna y al menos una bobina con función de recepción en la que circula una corriente inducida y que, por ello, tiene una fuerza electromotriz inducida de la misma frecuencia que la de la corriente alterna de alimentación. Más precisamente, cuando la cabeza de control del sensor de control no  
15 destructivo con corrientes de Foucault se coloca cerca de una pieza a inspeccionar, la bobina con función de emisión está alimentada con una señal sinusoidal. Se emite entonces un campo electromagnético en una misma frecuencia en el aire y en la pieza a inspeccionar. Como resultado, en los bornes de la bobina con función de recepción, se induce una fuerza electromotriz proveniente, por una parte, del acoplamiento entre la bobina con función de emisión y la bobina con función de recepción (dicho acoplamiento se ve modificado en  
20 presencia de la pieza) y, por otra parte, del campo magnético radiado por las corrientes inducidas en la pieza y que traduce la eventual presencia de un defecto en ésta.

En una configuración con funciones de emisión y recepción separadas, una cabeza de control puede comprender una primera bobina con función de emisión y una segunda bobina con función de recepción. En un modo diferencial de recepción, una cabeza de control con esta configuración puede comprender una  
25 primera bobina con función de emisión y otras dos bobinas con función de recepción montadas en diferencial. En un modo diferencial de emisión, una cabeza de control con esta configuración puede comprender dos bobinas con función de emisión montadas en diferencial y una tercera bobina con función de recepción.

En otra configuración con funciones de emisión y recepción comunes, una cabeza de control puede comprender una primera bobina con función simultánea de recepción y de emisión. En modo diferencial de  
30 recepción o de emisión, las dos bobinas pueden estar montadas en diferencial, por ejemplo en un circuito en puente de Wheatstone.

En una y otra de las configuraciones anteriormente citadas, se puede utilizar un número mayor de bobinas.

En todos los casos, la configuración geométrica de las bobinas puede optimizarse durante la fabricación de una cabeza de control según ciertos criterios de funcionamiento. Resulta particularmente interesante concebir  
35 una configuración geométrica de las bobinas que permite minimizar la fuerza electromotriz inducida en el circuito con función de recepción cuando la cabeza de control se encuentra a una distancia nominal predeterminada de una pieza sin defecto a inspeccionar, estando dicha fuerza electromotriz inducida en dicha situación calificada como acoplamiento directo. También resulta interesante maximizar toda variación de la fuerza electromotriz inducida en el circuito con función de recepción cuando dicha variación es producto de la  
40 presencia de un defecto tipo a detectar en la pieza a inspeccionar cuando la cabeza de control se encuentra a esta misma distancia nominal predeterminada de la pieza. En efecto, esto permite limitar la amplificación de la señal útil que constituye la variación de fuerza electromotriz debida a la presencia del defecto y facilitar su detección.

Más concretamente, la invención también se aplica para la fabricación de cabezas de control que comprenden al menos dos bobinas con funciones de emisión y/o recepción y se refiere a un proceso de fabricación que comprende las etapas siguientes:

- 5           – Optimización de una configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control al menos según uno de los criterios siguientes:
  - minimización de una fuerza electromotriz  $E$  inducida en al menos una bobina con función de recepción cuando la cabeza de control está a una distancia nominal predeterminada de una pieza sin defecto a inspeccionar, y
  - 10           • maximización de una variación  $\Delta e$  de dicha fuerza electromotriz inducida  $E$ , debiéndose dicha variación  $\Delta e$  a la presencia de un defecto tipo a detectar en la pieza a inspeccionar cuando la cabeza de control está a dicha distancia nominal de la pieza para inspeccionar.
- fabricación de la cabeza de control respetando la configuración geométrica de las bobinas que realizan dicha optimización.

15   Tal proceso de fabricación está divulgado, por ejemplo, en la patente publicada bajo el número FR 2 881 827 B1. Más precisamente, en dicho documento, se utiliza un criterio de maximización del módulo de la relación  $\Delta e/E$ , cuando  $E$  y  $\Delta e$  están expresadas en valores complejos, para seleccionar una distancia óptima entre los ejes respectivos de una bobina de emisión y de una bobina de recepción. La señal útil reveladora de un defecto presenta entonces la ventaja de ser mono-polar y muy fina, permitiendo así una buena localización del defecto.

20   Sin embargo, dicho proceso está limitado a una configuración con funciones de emisión y recepción separadas en modo no diferencial. Además, se adquiere una configuración geométrica con solapamiento de las dos bobinas, de modo que la cabeza de control tiene un eje de detección privilegiado. Por tanto, el sensor no es isótropo; por ello, las señales útiles reveladoras de dos defectos de idéntica longitud pero con orientaciones diferentes presentan amplitudes y formas que pueden ser muy diferentes. Por ello, una forma idéntica (con una diferencia de una rotación) sería deseable, ya sea para detectar todos los defectos presentes en la pieza o bien para estimar parámetros geométricos de dichos defectos.

25   Tal proceso de fabricación está también divulgado en un modo de realización de la patente americana publicada bajo el número US 6.310.476 B1. Según este modo de realización, la configuración de las bobinas es tal que éstas son todas coaxiales, pero la función de recepción está realizada por dos bobinas montadas en modo diferencial. Con una dimensión optimizada, dicha configuración permite concebir un sensor isótropo minimizando al mismo tiempo el acoplamiento directo entre las funciones de emisión y de recepción.

30   Por el contrario, permanece sensible a las variaciones entrehierro, es decir a las variaciones de distancia entre la cabeza de control y la pieza a controlar cuando el sensor se desplaza por encima de ésta última. Sin embargo, las variaciones entrehierro son inevitables cuando se emplea la corriente de un sensor de control no destructivo, por ejemplo debido a vibraciones o bien, en el caso de una pieza a inspeccionar de forma compleja, por el hecho de que el sensor, aun siendo flexible, no puede adaptarse con precisión a la pieza. Son susceptibles entonces de modificar el acoplamiento entre las funciones de emisión y de recepción del sensor y de generar así un ruido perjudicial para la detección de los defectos.

35   Esta sensibilidad a las variaciones entrehierro puede mejorarse, tal como se propone en otros modos de realización de la patente americana publicada bajo el número US 6.310.476 B1, pero con un número mayor de bobinas con función de recepción y, por tanto, una dimensión más importante. Además, en estos otros modos de realización ya no se verifica la coaxialidad de las bobinas.

Un proceso algo diferente se divulga en la patente francesa publicada bajo el número FR 2 904 694 B1, donde se optimiza una distancia entre las bobinas de emisión y de recepción en base a un criterio específico de minimización de la sensibilidad a las variaciones entrehierro.

5 Sin embargo, este proceso, como el descrito en el documento FR 2 881 827 B1, está limitado a una configuración con funciones de emisión y recepción separadas en modo no diferencial. Además culmina igualmente en una configuración geométrica que tiene un eje privilegiado de detección. Finalmente, es incompatible con el descrito en el primer modo de realización del documento US 6.310.476 B1.

10 Es necesario prever entonces un proceso de fabricación de una cabeza de control de un sensor con control no destructivo con corrientes de Foucault que permita evitar al menos parte de los problemas y limitaciones anteriormente citados.

Así, la invención tiene por objeto un procedimiento de fabricación de una cabeza de control de un sensor de control no destructivo con corrientes de Foucault, comprendiendo dicha cabeza de control al menos dos bobinas con funciones de emisión y/o de recepción, que comprende las etapas siguientes:

- 15 – optimización de una configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control según al menos uno de los criterios siguientes:
  - minimización de una fuerza electromotriz  $E$  inducida en al menos una bobina con función de recepción cuando la cabeza de control está a una distancia nominal predeterminada de una pieza sin defecto a inspeccionar, y
  - 20 • maximización de una variación  $\Delta e$  de dicha fuerza electromotriz inducida  $E$ , debiéndose dicha variación  $\Delta e$  a la presencia de un defecto tipo a detectar en la pieza que se debe inspeccionar cuando la cabeza de control se encuentra a dicha distancia nominal de la pieza a inspeccionar.
- fabricación de la cabeza de control respetando la configuración geométrica de las bobinas que realizan dicha optimización,
- 25 donde:
  - la optimización de la configuración geométrica de las bobinas se realiza además según al menos un criterio de optimización de otra variación  $\Delta E$  de dicha fuerza electromotriz inducida  $E$ , debiéndose esta otra variación  $\Delta E$  a una variación de la distancia entre la cabeza de control y la pieza a inspeccionar y,
  - 30 – la optimización de la configuración geométrica de las bobinas comprende la optimización de las dimensiones geométricas de cada una de estas bobinas.

35 Así, la optimización de la configuración geométrica de las bobinas puede llevarse a cabo según varios parámetros de dimensionamiento geométrico de las bobinas de la cabeza de control y en función de diversos criterios que incluyen al menos uno de la magnitud  $E$  o  $\Delta e$  y la magnitud  $\Delta E$ . Se puede entonces fabricar, con gran flexibilidad en los criterios de optimización y en los parámetros a optimizar, una cabeza de control que tiene una alta sensibilidad a los defectos, una baja sensibilidad al ruido generado por las variaciones entrehierro y una buena dinámica de detección.

40 Opcionalmente, la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se inicializa previamente imponiendo al menos uno de los elementos del grupo consistente en el número de bobinas, la atribución de la función de emisión y/o recepción para cada bobina y la coaxialidad de todas las bobinas.

En particular, si la coaxialidad de las bobinas se impone, puede concebirse un sensor isótropo.

También de forma opcional, la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se optimiza variando al menos uno de los elementos del grupo consistente en los diámetros internos y externos de cada bobina, el número de espiras, su espesor, la distancia nominal con respecto a la pieza a inspeccionar y la frecuencia eléctrica de la corriente que circula en las bobinas.

- 5 También opcionalmente, la optimización de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se realiza, entre otros, según un criterio de minimización de la relación  $|E|/|\Delta e|$ , donde  $|E|$  y  $|\Delta e|$  son los módulos respectivos de  $E$  y  $\Delta e$  expresados en forma compleja.

- 10 También de forma opcional, la optimización de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se realiza, entre otros, según un criterio de minimización de la relación  $|\Delta E|/|\Delta e|$ , donde  $|\Delta E|$  y  $|\Delta e|$  son los módulos respectivos de  $\Delta E$  y  $\Delta e$  expresados en forma compleja.

También opcionalmente, la optimización de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se realiza, entre otros, según un criterio de minimización de la diferencia entre, por una parte,  $\pm\pi/2$  y, por otra, el desfase entre  $\Delta E$  y  $\Delta e$  expresados en forma compleja.

- 15 Igualmente de forma opcional, la optimización de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se realiza, entre otros, según un criterio de minimización de la relación:

$$\frac{\cos[\varphi(\Delta E) - \varphi(\Delta e)]}{|\Delta e|}$$

o de modo equivalente de la relación:

$$\frac{\cot an[\varphi(\Delta E) - \varphi(\Delta e)]}{|\Delta e|}$$

- 20 donde  $\varphi(\Delta E)$  y  $\varphi(\Delta e)$  son las fases respectivas de  $\Delta E$  y  $\Delta e$  expresadas en forma compleja, y  $|\Delta e|$  es el módulo de  $\Delta e$ .

También de forma opcional, la optimización se realiza en base a:

- 25
- una simulación de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control que permite evaluar la citada fuerza electromotriz inducida  $E$ , la citada variación  $\Delta e$  y la otra variación  $\Delta E$ , y
  - una optimización, principalmente minimización, multidimensional no lineal y no limitada de tipo Nelder-Mead, aplicada bajo dichos criterios.

También opcionalmente, la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se inicializa previamente imponiendo las condiciones siguientes:

- 30
- el número de bobinas de la cabeza de control se fija en tres, entre ellas una bobina de emisión y dos bobinas de recepción montadas de forma diferencial,
  - las tres bobinas de la cabeza de control son anulares y coaxiales,
  - las dos bobinas de recepción de la cabeza de control son además coplanarias.

También de modo opcional, la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control se inicializa previamente imponiendo las condiciones siguientes:

- el número de bobinas de la cabeza de control se fija en dos, cada una con una función común de emisión/recepción,
- estas dos bobinas se montan en modo diferencial en un circuito en puente de Wheatstone,
- estas dos bobinas son anulares, coplanarias y coaxiales.

5 La invención se comprenderá mejor a partir de la descripción siguiente, dada únicamente a título de ejemplo, y en referencia a las figuras adjuntas, en las cuales:

- Figura 1: ilustra las etapas sucesivas de un proceso de fabricación de una cabeza de control de un sensor de control no destructivo con corrientes de Foucault, según una forma de realización de la invención,
- 10 Figuras 2, 3 y 4: diagramas que ilustran, en un plano complejo, los criterios de optimización empleados en el proceso de fabricación de la figura 1,
- Figuras 5 y 6: diagramas que ilustran, en un plano complejo, los resultados de optimización obtenidos por la ejecución del proceso de fabricación de la figura 1, para una configuración de cabeza de control con funciones de emisión y recepción separadas en modo diferencial de recepción,
- 15 Figura 7: ilustra el resultado de la ejecución del proceso de fabricación de la figura 1 en base a una configuración de cabeza de control con función de emisión/recepción común de sus bobinas y en modo diferencial de recepción,
- Figura 8: diagrama que ilustra, en un plano complejo, un resultado de optimización obtenido por la ejecución del proceso de fabricación de la figura 1 para la configuración de cabeza de control de la figura 7 y
- 20 Figura 9: ilustra esquemáticamente el principio de concepción, gracias a la ejecución del proceso de fabricación de la figura 1, de una cabeza de control multi-elemento matricial.
- 25 A título puramente ilustrativo, se muestra el proceso de fabricación de la figura 1 para la concepción particular de una cabeza de control 10 con tres bobinas coaxiales, de las cuales una bobina con función de emisión y dos bobinas con función de recepción montadas en modo diferencial. Pero tal como se verá a continuación, este proceso puede aplicarse a otras configuraciones de cabezas de control.

30 Durante una primera etapa de inicialización 100, se imponen ciertos parámetros  $P_i$  de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control 10.

En el ejemplo de la figura 1 anterior:

- el número de bobinas de la cabeza de control 10 deseado se fija en tres, de las cuales una bobina de emisión E y dos bobinas de recepción  $R^+$  y  $R^-$  montadas en modo diferencial,
- las tres bobinas E,  $R^+$  y  $R^-$  son anulares y coaxiales,
- 35 - las dos bobinas de recepción  $R^+$  y  $R^-$  son además coplanarias.

40 En general, la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control 10 se inicializa previamente durante esta etapa imponiendo un número de bobinas, la atribución de la función de emisión y/o recepción para cada bobina, la coaxialidad de al menos una parte de las bobinas u otros parámetros limitantes según la aplicación o el caso deseados. Se puede pensar así en un gran número de configuraciones para las cabezas de control.

A continuación, durante una etapa de optimización 102, en base a los parámetros  $P_i$  impuestos en la etapa de inicialización 100, otros parámetros  $P_f$  denominados finales, que permiten una fabricación concreta de la cabeza de control 10, se inicializan y modifican en el marco de una optimización multidimensional y con criterios múltiples de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control 10.

- Estos parámetros finales  $P_f$  comprenden principalmente al menos parámetros de dimensiones geométricas de cada una de las bobinas definidas en la etapa de inicialización 100. Por tanto, comprenden, por ejemplo, cuando las bobinas son anulares, los valores de los diámetros internos y externos de cada bobina y los valores de sus espesores respectivos. Los parámetros finales pueden además comprender el número de espiras de cada bobina, o el valor de la distancia nominal entre la cabeza de control 10 y la pieza a inspeccionar cuando debe preverse una capa protectora y aislante entre las bobinas de la cabeza de control y la superficie de la pieza a inspeccionar contra la cual dicha capa protectora y aislante entra en contacto. Pueden comprender también el valor de la frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan por las bobinas, aunque éste puede ser una variante impuesta en la inicialización 100.
- 5
- 10 Algunos de los parámetros finales están relacionados entre sí. Por ejemplo, debido a que no está permitido un solapamiento de las bobinas de recepción  $R^+$  y  $R^-$  debido a los parámetros impuestos en la inicialización 100 (son coplanarias), el diámetro externo de la más pequeña de estas dos bobinas es necesariamente inferior al diámetro interno de la otra. Otros parámetros tienen un rango de variación más limitado, por ejemplo el número de espiras.
- 15 En el ejemplo de la figura 1, los criterios según los cuales se realiza la optimización multidimensional de la configuración geométrica de las bobinas comprenden un primer criterio denominado C1 de:
- minimización de una fuerza electromotriz  $E$  inducida en los bornes del circuito constituido por las dos bobinas de recepción  $R^+$  y  $R^-$  cuando la cabeza de control 10 está a una distancia nominal  $h$  predeterminada de una pieza sin defecto a inspeccionar, y/o
  - 20 - maximización de una variación  $\Delta e$  de dicha fuerza electromotriz inducida  $E$ , debiéndose dicha variación  $\Delta e$  a la presencia de un defecto tipo a detectar en la pieza a inspeccionar cuando la cabeza de control está a la distancia nominal  $h$ .

El criterio C1 puede entonces calificarse como criterio de minimización del acoplamiento directo  $E$  (que incluye el efecto de la proximidad de una pieza sin defecto a inspeccionar) entre las funciones de emisión y de recepción de la cabeza de control 10, según la medición  $\Delta e$  que debe ser efectuada por la cabeza de control 10 para detectar eventuales defectos.

25

A título de ejemplo, el criterio C1 puede definirse con mayor precisión para maximizar la variación  $\Delta e$  debida a la presencia de un defecto en relación al acoplamiento directo  $E$ , lo que puede expresarse básicamente con la ayuda del ratio  $|E|/|\Delta e|$  a minimizar, donde  $|E|$  y  $|\Delta e|$  son los módulos respectivos de  $E$  y  $\Delta e$  cuando dichas medidas están expresadas en forma compleja. Como variante, el criterio C1 puede adquirir formas distintas a las del ratio expresado anteriormente, pueden imaginarse numerosas formas equivalentes para maximizar  $\Delta e$  con respecto a  $E$ .

30

Una ilustración de la optimización del criterio C1 se muestra en la figura 2, donde un diagrama representa, en el plano complejo, las variaciones de la fuerza electromotriz inducida  $E + \Delta e$  en los bornes del circuito de recepción de la cabeza de control 10 en presencia de un defecto tipo en la pieza a inspeccionar. La señal característica del defecto tipo a detectar es la curva cerrada  $D_h$  en forma de "8". Su mayor dimensión da la amplitud máxima de la variación de la fuerza electromotriz inducida debida a la presencia del defecto tipo. Dicha amplitud máxima puede considerarse como valor de  $|\Delta e|$ . La distancia entre el centro de la curva  $D_h$  (ausencia de defecto detectado) y el centro  $O$  del plano complejo da el valor de  $|E|$ . La optimización del criterio C1 consiste entonces en obtener la curva  $D_h$  lo más grande posible y la más próxima posible al origen  $O$  del plano complejo.

35

40

En el ejemplo de la figura 1, los criterios según los cuales se realiza la optimización multidimensional de la configuración geométrica de las bobinas comprenden además un segundo criterio denominado C2 de optimización de otra variación  $\Delta E$  de dicha fuerza electromotriz inducida  $E$ , debiéndose esta variación  $\Delta E$  a

una variación de la distancia entre la cabeza de control 10 y la pieza a inspeccionar, por ejemplo cuando la cabeza de control 10 está desplazada con respecto a la pieza.

El criterio C2 puede calificarse entonces como criterio de minimización de la sensibilidad de la cabeza de control 10 a las variaciones entrehierro. Además, puede expresarse en relación a la medida  $\Delta e$  que debe ser  
 5 efectuada por la cabeza de control 10 para detectar eventuales defectos. A título de ejemplo, el criterio C2 puede definirse con mayor precisión con el fin de maximizar la variación  $\Delta e$  debida a la presencia de un defecto con respecto a la variación  $\Delta E$  debida a las variaciones entrehierro, lo que puede expresarse esencialmente mediante el ratio  $|\Delta E|/|\Delta e|$  a minimizar, siendo  $|\Delta E|$  y  $|\Delta e|$  los módulos respectivos de  $\Delta E$  y  $\Delta e$  cuando esas dimensiones están expresadas en forma compleja. Como variante, el criterio C2 puede adquirir  
 10 formas diferentes a las del ratio expresado anteriormente, pueden imaginarse numerosas formas equivalentes para maximizar  $\Delta e$  con respecto a  $\Delta E$ .

Una ilustración de la optimización del criterio C2 se muestra en la figura 3, donde un diagrama representa, en el plano complejo, las variaciones de la fuerza electromotriz inducida  $E+\Delta e$  en los bornes del circuito de recepción de la cabeza de control 10 en presencia de un defecto tipo en la pieza a inspeccionar, para dos  
 15 valores de distancia entre la cabeza de control 10 y la pieza a inspeccionar, por ejemplo la distancia nominal  $h$  anteriormente citada y otra distancia  $h+\Delta h$ . Se obtienen así dos curvas cerradas en forma de "8" aproximadamente del mismo tamaño, pero desfasadas una con respecto a la otra. La primera es la curva  $D_h$  de la figura 2, la segunda es una curva  $D_{h+\Delta h}$  correspondiente a la distancia  $h+\Delta h$ . La distancia entre el centro de la curva  $D_h$  y el de la curva  $D_{h+\Delta h}$  da el valor de  $|\Delta E|$ , mientras que la de  $|\Delta e|$  siempre está dada por la mayor dimensión de la curva  $D_h$  (o  $D_{h+\Delta h}$ ). La optimización del criterio C2 consiste entonces en conseguir que las curvas  $D_h$  y  $D_{h+\Delta h}$  estén lo más cerca posible entre sí en el plano complejo.

En el ejemplo de la figura 1, los criterios según los cuales está realizada la optimización multidimensional de la configuración geométrica de las bobinas comprenden además un tercer criterio denominado C3 de optimización de la variación  $\Delta E$ .

25 El criterio C3 puede calificarse entonces, como el criterio C2, como criterio de minimización de la sensibilidad de la cabeza de control 10 a las variaciones entrehierro. También puede expresarse en relación a la medida  $\Delta e$  que debe ser efectuada por la cabeza de control 10 para detectar eventuales defectos.

A título de ejemplo, el criterio C3 puede ser definido más precisamente con el fin de optimizar el desfase entre la variación  $\Delta e$  debida a la presencia de un defecto y la variación  $\Delta E$  debida a las variaciones entrehierro, con  
 30 el fin de poder discriminar con mayor facilidad estas dos variaciones. En particular se pretende que dicho desfase sea lo más próximo posible a un ángulo recto, es decir  $\pm\pi/2$ . El criterio C3 puede ser expresado básicamente mediante el ratio siguiente a minimizar:

$$\frac{\cos[\varphi(\Delta E) - \varphi(\Delta e)]}{|\Delta e|}$$

o de modo equivalente

$$\frac{\cot an[\varphi(\Delta E) - \varphi(\Delta e)]}{|\Delta e|}$$

35

Donde  $\varphi(\Delta E)$  y  $\varphi(\Delta e)$  son las fases respectivas de  $\Delta E$  y  $\Delta e$  expresadas en forma compleja, siendo  $|\Delta e|$  siempre el módulo de  $\Delta e$ . Como variante, el criterio C3 puede adquirir otras formas que la de uno de los dos ratios expresados anteriormente, pueden imaginarse numerosas formas equivalentes para optimizar el desfase entre  $\Delta e$  y  $\Delta E$ .

Una ilustración de la optimización del criterio C3 se muestra en la figura 4, donde el diagrama representa, en el plano complejo, las mismas curvas  $D_h$  y  $D_{h+\Delta h}$  que en la figura 3. Pero en la figura 4, para la consideración del criterio C3, es el desfase  $\varphi(\Delta E)-\varphi(\Delta e)$  entre  $\Delta e$  y  $\Delta E$  el valor pertinente para optimizar, aproximándolo lo más posible a un ángulo recto. La optimización del criterio C3 consiste entonces en tratar de que el desfase entre las curvas  $D_h$  y  $D_{h+\Delta h}$  sea lo más ortogonal posible al vector  $\Delta e$ , teniendo éste último el módulo más grande posible.

5

En el ejemplo de la figura 1, los tres criterios C1, C2 y C3 se utilizan durante la etapa de optimización 102. Pero como variante y siempre manteniéndose en el marco de la invención, únicamente los criterios C1 y C2, o C1 y C3 podrían ser tomados en cuenta.

10

La etapa de optimización 102, multidimensional (por la presencia de varios parámetros finales  $P_f$  a optimizar), a priori no lineal, no limitada y con criterios múltiples (por la consideración de C1 y C2, o C1 y C3, o C1 y C2 y C3), puede ejecutarse mediante diferentes algoritmos conocidos. De forma práctica, formalizando esta optimización en forma de una función multidimensional, no lineal y no limitada a minimizar, puede emplearse el algoritmo de Nelder-Mead en esta etapa del proceso de fabricación. Como variante, también pueden ser

15

utilizados algoritmos genéricos menos sensibles a los mínimos locales.

Durante dicha optimización de los parámetros finales  $P_f$  para responder a los criterios adoptados, la configuración geométrica de las bobinas ventajosamente se simula para evaluar el acoplamiento directo E, dicha variación  $\Delta e$  y la otra variación  $\Delta E$ . La simulación se realiza, por ejemplo, con el programa de simulación de control no destructivo conocido bajo el nombre de CIVA (marca registrada), o cualquier otro programa de simulación, principalmente por elementos acabados.

20

A la etapa de optimización 102 le sigue una etapa 104 de selección de los parámetros finales  $P_f$  que realiza dicha optimización.

Finalmente, durante una etapa final 106, se fabrica la cabeza de control 10 respetando la configuración geométrica de las bobinas definida por los parámetros iniciales  $P_i$  y finales  $P_f$ .

25

Tal como se ilustra en la figura 1, parte inferior, en corte y en vistas en planta, la cabeza de control 10 obtenida después de la etapa de fabricación 106 está realizada concretamente con un film flexible de poliimida de 50  $\mu\text{m}$  de espesor que presenta cuatro capas  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  y  $L_4$ . El espesor de las tres bobinas E,  $R^+$  y  $R^-$  es, por ejemplo, igual al espesor de una pista de cobre, o sea para este ejemplo de 9  $\mu\text{m}$ . Para la bobina con función de emisión E, el circuito de emisión donde está integrada así como sus espiras están materializadas con un cable de cobre  $W_E$ . Para las dos bobinas con función de recepción  $R^+$  y  $R^-$ , el circuito de recepción en el cual están montadas en modo diferencial así como sus espiras están hechas con un cable de cobre  $W_R$ .

30

En la capa inferior  $L_1$ , el cable de cobre  $W_R$  se enrolla en un primer sentido a partir del diámetro externo de la bobina  $R^+$  hasta su diámetro interno, formando así la bobina  $R^+$ , y se enrolla en un segundo sentido opuesto al primero a partir del diámetro externo de la bobina  $R^-$  hasta su diámetro interno, formando así la bobina  $R^-$ . A continuación sube a lo largo del eje común de las dos bobinas  $R^+$  y  $R^-$  hacia la capa  $L_2$ , mediante una conexión. Dicha capa  $L_2$  cumple simplemente una función de guía del cable de cobre  $W_R$  para formar el circuito de recepción. En la capa  $L_3$ , el cable de cobre  $W_E$  se enrolla en un sentido predeterminado a partir del diámetro externo de la bobina E hasta su diámetro interno, formando así la bobina E. Sube a continuación a lo largo del eje de la bobina E, que es igualmente común a las dos bobinas  $R^+$  y  $R^-$ , hacia la capa superior  $L_4$  mediante una conexión. Dicha capa superior  $L_4$  cumple simplemente una función de guía del cable de cobre  $W_E$  para formar el circuito de emisión.

40

En un marco experimental, se sumaron las condiciones siguientes:

## ES 2 563 052 T3

- el número de espiras de las tres bobinas debe ser máximo para incrementar la sensibilidad y, por razones tecnológicas, se fija en 160  $\mu\text{m}$  la resolución de las espiras (ancho pista de cobre + ancho aislante entre espiras),
- 5 - los diámetros interiores y exteriores de las bobinas se ajustan para obtener un número entero de espiras,
- se utiliza un celo de poliimida autoadhesivo de 50  $\mu\text{m}$  de espesor para proteger el frente de la cabeza de control 10 en contacto con la pieza a inspeccionar,
- el defecto tipo para detectar en la pieza es el siguiente: defecto superficial de 1 mm de longitud, 100  $\mu\text{m}$  de ancho y 500  $\mu\text{m}$  de profundidad,
- 10 - la variación entrehierro  $\Delta h$  tenida en cuenta en la etapa de optimización 102 es de 25  $\mu\text{m}$  durante el desplazamiento de la cabeza de control 10,
- la frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan en las bobinas se fija inicialmente en 1MHz, ajustándose también dicho parámetro durante la etapa de optimización 102.

15 Según una ponderación de los tres criterios C1, C2 y C3 que favorece a los dos primeros, en la etapa 104 se obtiene por ejemplo la configuración geométrica siguiente:

Bobina de emisión E: - diámetro interno = 0,3880 mm,

- diámetro externo = 6,3080 mm,
- número de espiras = 19.

Bobina de recepción R: diámetro interno = 1,4240 mm,

- 20
- diámetro externo = 3,5040 mm,
  - número de espiras = 7.

Bobina de recepción R<sup>+</sup>: - diámetro interno = 4,3640 mm,

- diámetro externo = 5,4840 mm,
- número de espiras = 4.

25 Frecuencia eléctrica optimizada: muy próxima a 1 MHz.

Para esta configuración, la figura 5 ilustra, mediante un diagrama equivalente al de la figura 3 o 4, las curvas  $D_h$  y  $D_{h+\Delta h}$ , con  $h = 50 \mu\text{m}$  y  $\Delta h = 25 \mu\text{m}$ .

Se observa que:

- 30 - ante la ausencia de defecto (centro de la curva  $D_h$ ), la señal detectada es muy próxima al origen O del plano complejo, por tanto el acoplamiento directo E es casi nulo,
- además, el acoplamiento directo E es muy reducido ante la variación  $\Delta e$  debida a la presencia del defecto tipo (criterio C1 respetado),
- durante una variación entrehierro  $\Delta h$ , la variación  $\Delta E$  debida a dicha variación entrehierro es muy reducida ante la variación  $\Delta e$  debida a la presencia del defecto tipo (criterio C2 respetado), y
- 35 - la diferencia de fase entre  $\Delta E$  y  $\Delta e$  es próxima a  $5\pi/12$  (criterio C3 respetado en menor medida).

Según otra ponderación de los tres criterios C1, C2 y C3 que favorece al tercero, en la etapa 104 se obtiene por ejemplo la configuración geométrica siguiente:

Bobina de emisión E: - diámetro interno = 0,3780 mm,

- 40
- diámetro externo = 6,2980 mm,
  - número de espiras = 19.

Bobina de recepción R: diámetro interno = 1,5180 mm,

- diámetro externo = 3,9180 mm,
- número de espiras = 8.

Bobina de recepción R<sup>+</sup>: - diámetro interno = 4,1300 mm,

## ES 2 563 052 T3

- diámetro externo = 5,5700 mm,
- número de espiras = 4.

Frecuencia eléctrica optimizada: muy próxima a 1 MHz.

5 Para esta configuración, la figura 6 ilustra, mediante un diagrama equivalente al de la figura 3 o 4, las curvas  $D_h$  y  $D_{h+\Delta h}$ , con  $h=50\mu\text{m}$  y  $\Delta h=25\mu\text{m}$ .

Se constata que la diferencia de fase entre  $\Delta E$  y  $\Delta e$  se aproxima a  $\pi/2$  (criterio C3 respetado), mediante valores menos óptimos de  $E$  y  $\Delta E$  (criterios C1 y C2 respetados en menor medida).

10 El proceso de fabricación de la figura 1 se muestra para una cabeza de control 10 con tres bobinas coaxiales, de las cuales una con función de emisión y dos con función de recepción montadas en modo diferencial. Pero se aplica igualmente, por ejemplo, para una cabeza de control 10' con dos bobinas coaxiales, ambas con función común de emisión y de recepción, con la recepción garantizada en modo diferencial. Es el objeto de la figura 7 que ilustra esquemáticamente tal configuración de cabeza de control 10'.

Durante la primera etapa de inicialización 100, se imponen ciertos parámetros  $P_i$  de la configuración geométrica de las bobinas de la cabeza de control 10'. En el ejemplo de la figura 7:

- 15
- el número de bobinas de la cabeza de control 10' deseada se fija en dos, de las cuales una bobina con función común de emisión/recepción señalada con  $E/R^+$  y otra bobina con función común de emisión/recepción señalada con  $E/R^-$ ,
  - estas dos bobinas están montadas en modo diferencial en un circuito en puente de Wheatstone,
  - las dos bobinas  $E/R^+$  y  $E/R^-$  son anulares, coplanarias y coaxiales.

20 Tal como se ilustra en la figura 7 en la parte derecha, en corte y en planta, la cabeza de control 10' obtenida después de la etapa de fabricación 106 está realizada concretamente en un film flexible de poliimida que presenta dos capas  $L_1$  y  $L_2$ . El espesor de las dos bobinas  $E/R^+$  y  $E/R^-$  es por ejemplo igual al espesor de una pista de cobre, es decir para este ejemplo  $9\mu\text{m}$ . Para la bobina  $E/R^+$ , el circuito en el cual está integrada así como sus espiras están hechos de un cable de cobre  $W_{E/R^+}$ . Para la bobina  $E/R^-$ , el circuito en el cual está

25 integrada así como sus espiras están materializados con un cable de cobre  $W_{E/R^-}$ .

30 En la capa inferior  $L_1$ , el cable de cobre  $W_{E/R}$ , se enrolla en un primer sentido a partir del diámetro externo de la bobina  $E/R^+$  hasta su diámetro interno, formando así la bobina  $E/R^+$ . A continuación, sube en un espacio reservado entre las dos bobinas hacia la capa superior  $L_2$ , mediante una conexión. Igualmente, en la capa inferior  $L_1$ , el cable de cobre  $W_{E/R^-}$  se enrolla en un segundo sentido opuesto a partir del diámetro externo de la bobina  $E/R^-$  hasta su diámetro interno, formando así la bobina  $E/R^-$ . Sube a continuación a lo largo del eje común a las dos bobinas  $E/R^+$  y  $E/R^-$  hacia la capa superior  $L_2$ , mediante una conexión. La capa superior  $L_2$  cumple simplemente una función de guía de los cables de cobre  $W_{E/R^+}$  y  $W_{E/R^-}$ .

Según una ponderación posible de los tres criterios C1, C2 y C3, se obtiene por ejemplo en la etapa 104 la configuración geométrica siguiente:

- 35 Bobina de emisión/recepción  $E/R^-$ : - diámetro interno = 0,36 mm,
- diámetro externo = 2,44 mm,
  - número de espiras = 7.

- 40 Bobina de emisión/recepción  $E/R^+$  : - diámetro interno = 2,68 mm,
- diámetro externo = 3,80 mm,
  - número de espiras = 4.

Frecuencia eléctrica optimizada: muy próxima a 1 MHz.

Para esta configuración, la figura 8 ilustra, a través de un diagrama equivalente al de la figura 3 o 4, las curvas  $D_h$  et  $D_{h+\Delta h}$ , con  $h = 50\mu\text{m}$  y  $\Delta h = 25\mu\text{m}$ .

Se constata que:

- 5 - ante la ausencia de defecto (centro de la curva  $D_h$ ), la señal detectada es relativamente próxima al origen O del plano complejo, por tanto el acoplamiento directo E es relativamente reducido,
- además, el acoplamiento directo E es relativamente reducido ante la variación  $\Delta e$  debida a la presencia del defecto tipo (criterio C1 más o menos respetado),
- durante una variación entrehierro  $\Delta e$ , la variación  $\Delta E$  debida a dicha variación entrehierro es relativamente reducida ante la variación  $\Delta e$  debida a la presencia del defecto tipo (criterio C2 más o menos respetado), y
- 10 - la diferencia de fase entre  $\Delta E$  y  $\Delta e$  es próxima a  $\pi/2$  (criterio C3 respetado).

En general, el proceso de fabricación de la figura 1 se aplica para la concepción de cabezas de control que presentan configuraciones geométricas muy diversas:

- 15 - configuraciones con una bobina de emisión y dos bobinas de recepción en modo diferencial, tal como se observa en referencia a la figura 1, pero en las cuales las bobinas pueden ser ordenadas de diferentes maneras en las capas del soporte, coplanarias o no, con diferentes espesores, etc...
- configuraciones con dos bobinas de emisión en modo diferencial y una bobina de recepción, en las cuales las bobinas pueden igualmente estar ordenadas de diferentes maneras en las capas de soporte, coplanarias o no, con diferentes espesores, etc...
- 20 - configuraciones con dos bobinas con función común de emisión/recepción, como ya se ha visto en referencia a la figura 7, pero en las cuales las bobinas pueden ser ordenadas de diferentes maneras en las capas del soporte, coplanarias o no, con diferentes espesores, etc...
- configuraciones con un número de bobinas superior a tres.

25 De un modo también general, el proceso de fabricación descrito anteriormente es conveniente para cabezas de control cuyas bobinas son tanto de tipos variados como cableados, impresas o grabadas en soportes flexibles o rígidos.

También puede disponerse un núcleo de ferrita coaxial en una o varias de las bobinas de la cabeza de control o también cubrir el conjunto de las bobinas.

30 Por otra parte, tal como se ilustra en la figura 9, el motivo elemental, ilustrado en las figuras 1 y 8 y obtenido mediante la ejecución del proceso de fabricación descrito anteriormente, puede ser repetido para la fabricación de una cabeza de control multi-elementos. Además, en una configuración con funciones separadas de emisión y de recepción, como es el caso del ejemplo de la figura 1, una instalación matricial con conexión de los elementos en líneas (E1, E2) y en columnas (R1, R2, R3 y R4) es posible según el mismo proceso que el utilizado y descrito en la patente francesa publicada bajo el número FR 2 904 693 B1.

35 Se puede pensar entonces en evitar un sensor que comprende tal cabeza de control como generador de imágenes bidimensional, permitiendo la coaxialidad de las bobinas además reducir las zonas de sombra (es decir zonas de imposible detección de defectos).

40 En resumen, se evidencia claramente que un proceso de fabricación tal como el descrito anteriormente permite concebir cabezas de control de sensores de control no destructivo con corrientes de Foucault que presentan las ventajas siguientes:

- gran sensibilidad ante los defectos presentes en la pieza a inspeccionar,
- baja sensibilidad ante el ruido de variación entrehierro,
- isotropía,

- alta dinámica, por tanto con un acoplamiento directo bajo para permitir una buena amplificación de las señales significativas de defectos,
  - desfase óptimo entre las variaciones de fuerza electromotriz debidas a las variaciones entre hierro y aquellas debidas a los defectos,
- 5
- optimización de la configuración geométrica (coaxialidad) para la detección de los defectos,
  - fácil realización con film flexible de poliimida, en tres capas mínimo para las cabezas de control con funciones separadas de emisión y recepción, o dos capas como mínimo para las cabezas de control con función común de emisión/recepción,
- 10
- posibilidad de conexión simple en matriz para la realización de generadores de imágenes con un modo de conexión de las bobinas de emisión por línea y bobinas de recepción, obteniéndose la imagen entonces por un desplazamiento según un eje del sensor,
  - gracias a la baja ocupación espacial de la configuración geométrica del motivo elemental, posibilidad de concebir sensores de tipo generador de imágenes bidimensional estático minimizando las zonas de sombra, realizables con un film de poliimida con capas múltiples.
- 15
- Por otra parte, se señala que la invención no se limita a las formas de realización descritas anteriormente. Para el profesional en la materia serán evidentes diversas modificaciones que pueden aportarse a las formas de realización descritas anteriormente según las enseñanzas que acaban de ser divulgadas. En las reivindicaciones siguientes, los términos utilizados no deben ser interpretados como limitantes de las reivindicaciones a las formas de realización expuestas en la presente descripción, sino que deben
- 20
- interpretarse para incluir en ellas todos los equivalentes que las reivindicaciones quieren abarcar por su formulación y cuya previsión se encuentra al alcance del profesional en la materia al aplicar sus conocimientos generales para la realización de la enseñanza que acaba de serle comunicada.



5 **6.** Procedimiento de fabricación de una cabeza de control (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque la optimización (102) de la configuración geométrica ( $P_i$ ,  $P_f$ ) de las bobinas ( $E$ ,  $R^+$ ,  $R^-$ ;  $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) de la cabeza de control (10) está realizada, entre otros, según un criterio de minimización de la diferencia entre, por una parte,  $\pm\pi/2$  y, por otra parte, el desfase entre  $\Delta E$  y  $\Delta e$ , expresados en forma compleja.

10 **7.** Proceso de fabricación de una cabeza de control (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado porque la optimización (102) de la configuración geométrica ( $P_i$ ,  $P_f$ ) de las bobinas ( $E$ ,  $R^+$ ,  $R^-$ ;  $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) de la cabeza de control (10) está realizada, entre otros, según un criterio de minimización de la relación

$$\frac{\cos[\varphi(\Delta E) - \varphi(\Delta e)]}{|\Delta e|} \quad \text{o de modo equivalente de la relación} \quad \frac{\cot an[\varphi(\Delta E) - \varphi(\Delta e)]}{|\Delta e|}$$

donde  $\varphi(\Delta E)$  y  $\varphi(\Delta e)$  son las fases respectivas de  $\Delta E$  y  $\Delta e$ , expresadas en forma compleja, siendo  $|\Delta e|$  el módulo de  $\Delta e$ .

15 **8.** Procedimiento de fabricación de una cabeza de control (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque la optimización (102) está realizada en base a:

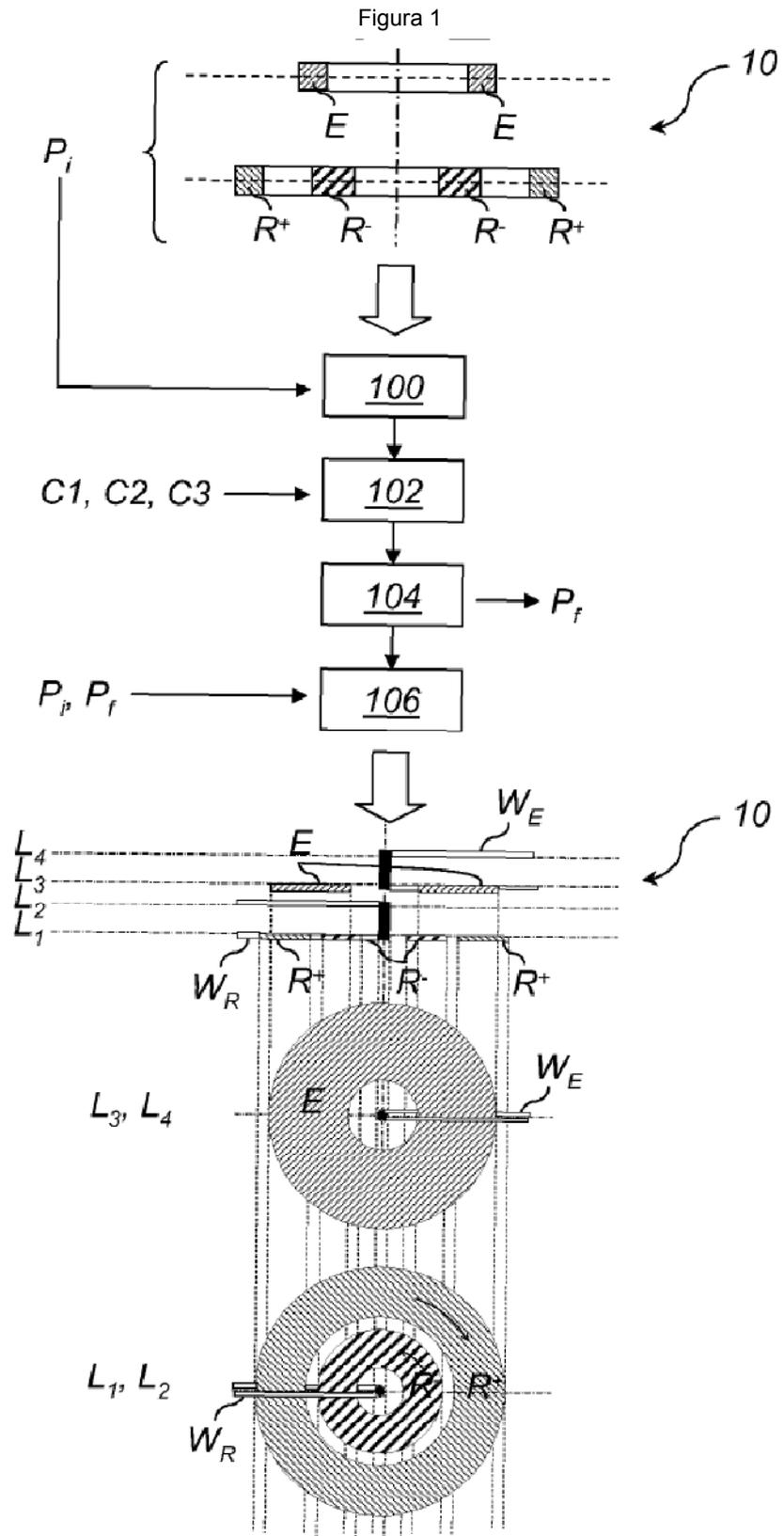
- una simulación de la configuración geométrica ( $P_i$ ,  $P_f$ ) de las bobinas ( $E$ ,  $R^+$ ,  $R^-$ ;  $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) de la cabeza de control (10) que permite evaluar la citada fuerza electromotriz inducida  $E$ , dicha variación  $\Delta E$  y dicha variación  $\Delta e$ , y
- una optimización, principalmente una minimización, multidimensional no lineal y no limitada de tipo Nelder-Mead, aplicada según dichos criterios (C1, C2, C3).

25 **9.** Proceso de fabricación de una cabeza de control (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque la optimización (102) de la configuración geométrica ( $P_i$ ,  $P_f$ ) de las bobinas ( $E$ ,  $R^+$ ,  $R^-$ ;  $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) de la cabeza de control (10) se inicializa previamente (100) imponiendo las condiciones siguientes:

- el número de bobinas de la cabeza de control se fija en tres, de las cuales una bobina de emisión ( $E$ ) y dos bobinas de recepción ( $R^+$ ,  $R^-$ ) están montadas en modo diferencial,
- las tres bobinas ( $E$ ,  $R^+$ ,  $R^-$ ) de la cabeza de control (10) son anulares y coaxiales,
- las dos bobinas de recepción ( $R^+$ ,  $R^-$ ) de la cabeza de control (10) son además coplanarias.

30 **10.** Proceso de fabricación de una cabeza de control (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque la configuración geométrica ( $P_i$ ,  $P_f$ ) de las bobinas ( $E$ ,  $R^+$ ,  $R^-$ ;  $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) de la cabeza de control (10) se inicializa previamente (100) imponiendo las condiciones siguientes:

- 35
- el número de bobinas de la cabeza de control se fija en dos, cada una ( $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) con función común de emisión/recepción,
  - estas dos bobinas ( $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) están montadas en modo diferencial en un circuito en puente de Wheatstone,
  - estas dos bobinas ( $E/R^+$ ,  $E/R^-$ ) son anulares, coplanarias y coaxiales.



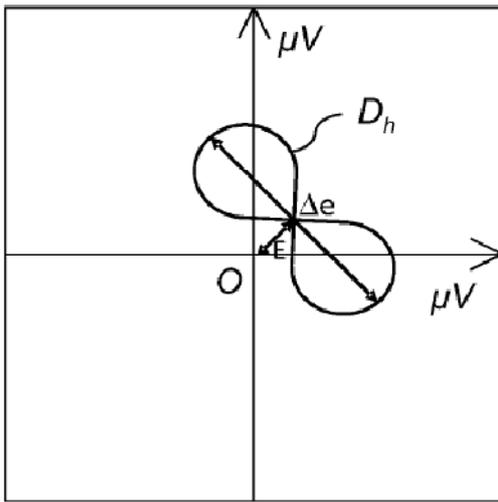


Figura 2

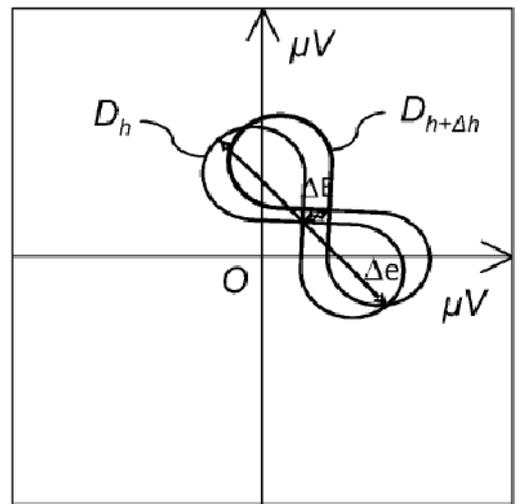


Figura 3

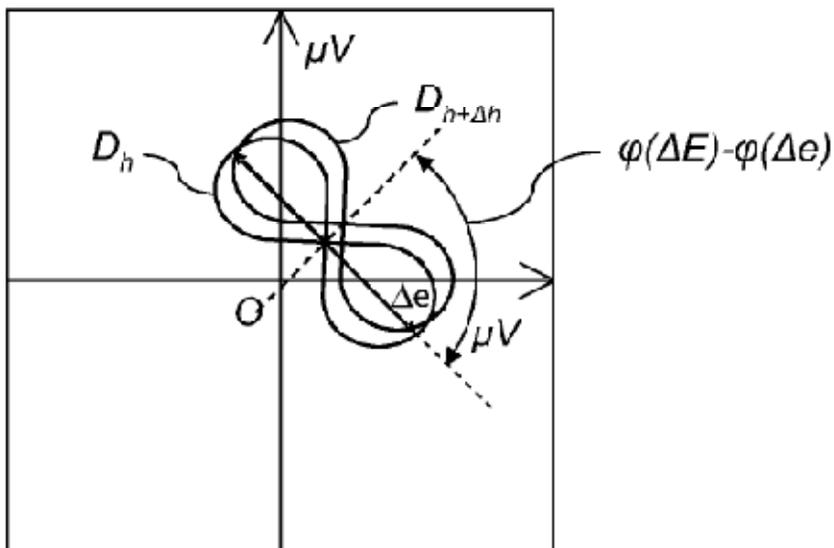


Figura 4

Figura 5

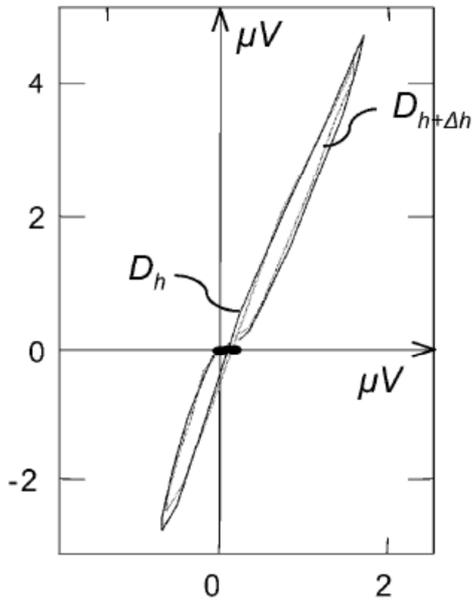


Figura 6

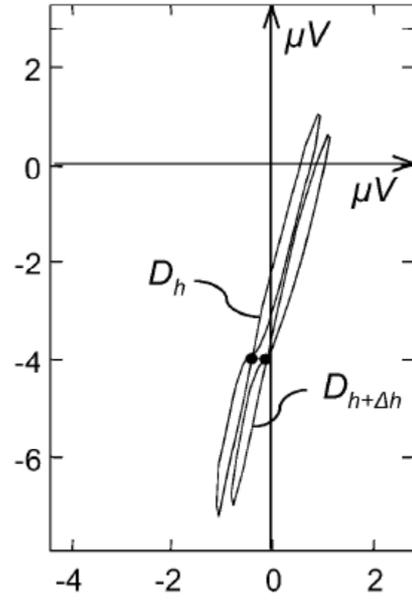


Figura 7

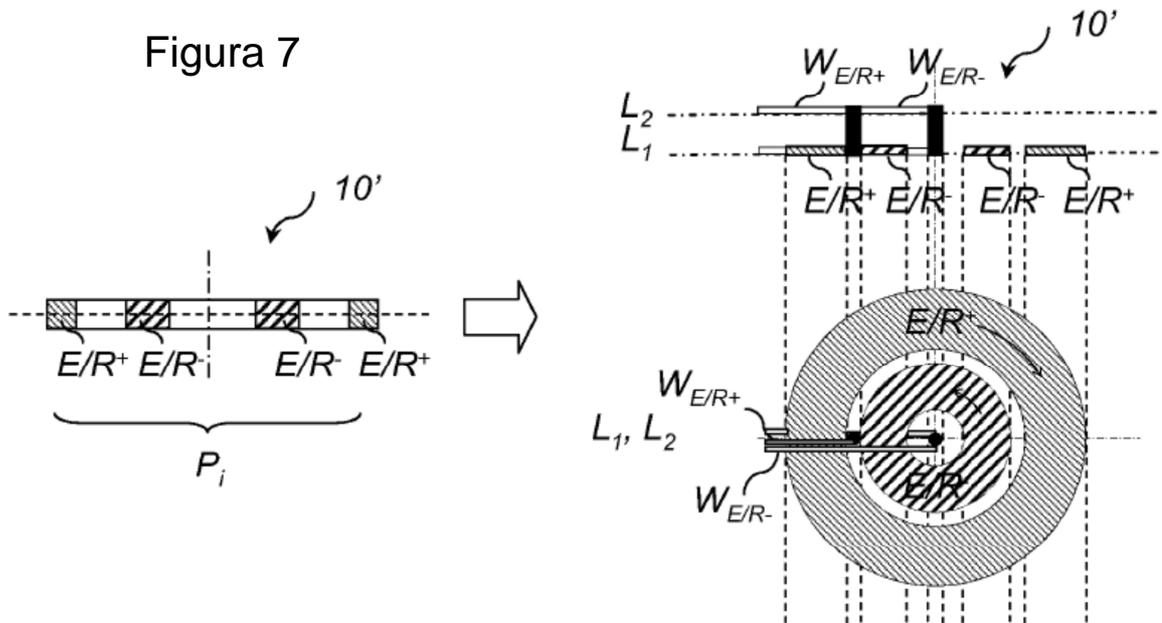


Figura 8

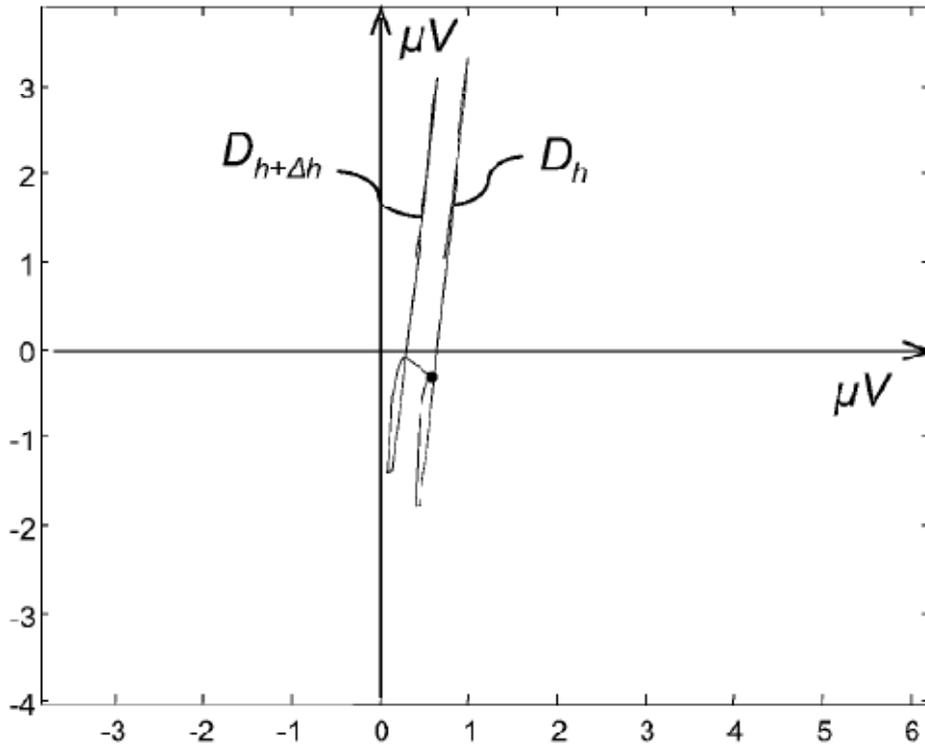


Figura 9

