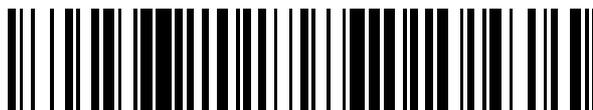


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 510 399**

51 Int. Cl.:

**G01R 33/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.01.2011 E 11704262 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.08.2014 EP 2524236**

54 Título: **Procedimiento mejorado de determinación de la imanación del casco de un buque y dispositivo asociado**

30 Prioridad:

**11.01.2010 FR 1050138**

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

**21.10.2014**

73 Titular/es:

**DCNS (100.0%)  
40-42, rue du Docteur Finlay  
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**DEMILIER, LAURENT;  
VUILLERMET, YANNICK;  
CHADEBEC, OLIVIER NICOLAS;  
COULOMB, JEAN-LOUIS;  
ROUVE, LAURE-LINE y  
CAUFFET, GILLES**

74 Agente/Representante:

**PONTI SALES, Adelaida**

**ES 2 510 399 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 mejorado de determinación de la imanación del casco de un buque y dispositivo asociado

- 5 **[0001]** La invención tiene como ámbito técnico el de los procesos de regulación de la firma magnética de un buque.
- [0002]** La firma de un buque es el conjunto de los valores del campo magnético creado por el buque, evaluado en un plano de referencia. Cuando se trata de un buque de superficie, este plano de referencia es generalmente horizontal, situado bajo el casco del buque aproximadamente a aproximadamente una vez la anchura del buque, es decir típicamente 10 a 30 m.
- 10 **[0003]** FR 2 825 803 divulga un procedimiento de regulación de la firma magnética de un buque.
- [0004]** En su parte de determinación de la firma del buque, este procedimiento prevé la adquisición de una pluralidad de medidas del campo magnético, mediante una pluralidad de sensores situados en el interior del casco del buque.
- 15 **[0005]** Luego, a partir de esta pluralidad de medidas y del valor del campo magnético terrestre local, prevé calcular la distribución de imanación la más probable en la superficie del casco utilizando una primera modelización que asocia una distribución de imanación a una pluralidad de medidas del campo magnético, y una segunda modelización que acopla la imanación en un punto del casco con la imanación en otro punto del casco.
- 20 **[0006]** La imanación en cuestión es la imanación total en un punto del casco, correspondiente a la suma de la imanación permanente y de la imanación inducida en este punto.
- 25 **[0007]** Finalmente, la distribución de imanación así calculada se utiliza para estimar el valor del campo magnético creado por el casco en el plano de referencia, es decir la firma del buque.
- [0008]** En su parte de regulación, este procedimiento prevé minimizar la firma del buque así determinada. Para ello, el casco del buque está dotado de varios lazos llamados « de inmunización magnética », hechos de un material conductor de la corriente eléctrica, y el buque lleva a bordo medios de potencia eléctrica que permiten hacer circular corrientes eléctricas adaptadas en cada uno de los lazos independientemente. La circulación de una corriente en un lazo genera un campo magnético que se superpone con el campo magnético terrestre local y el campo creado por la distribución de imanación en el casco, sabiendo que esta última está modificada por el campo magnético generado por los lazos. Así, regulando las corrientes eléctricas que circulan por los diferentes lazos, se minimiza la firma del buque.
- 30 **[0009]** La precisión de este procedimiento se basa en la representatividad de la pluralidad de medidas del campo magnético mediante la pluralidad de sensores situados en el interior del casco y en la aptitud de las modelizaciones primera y segunda para determinar con precisión la imanación del casco a partir de las medidas procedentes de los sensores.
- 35 **[0010]** Cuando los sensores están situados en el interior del casco, lejos de este, el procedimiento permite determinar de manera satisfactoria la imanación del casco correspondiente a las medidas efectuadas.
- 45 **[0011]** Sin embargo, la medida, en el aire, del campo magnético creado por el casco se perturba. Efectivamente, un buque encierra fuentes magnéticas secundarias, tales como las masas ferromagnéticas que constituyen sus motores. Estas fuentes magnéticas secundarias producen campos magnéticos secundarios que se superponen con el campo magnético creado por el casco. Los campos magnéticos secundarios constituyen una fuerte perturbación para la información que se intenta obtener mediante sensores. También, las medidas no son del todo representativas del campo magnético resultante de la imanación del casco. Gracias a ello, la imanación del casco calculada a partir de las medidas hechas en el interior del buque no es representativa, con precisión, de la imanación real del casco. De ello resulta que la firma del buque calculada así puede ser muy diferente de la firma real del buque.
- 50 **[0012]** Para mejorar la relación señal pertinente sobre la perturbación, se ha previsto acercar los sensores del casco, para disponerlos a proximidad inmediata de este y alejarlos, tanto como sea posible, de las fuentes magnéticas secundarias.
- 55 **[0013]** Sin embargo, cuando se acercan los sensores al casco, la firma determinada por la realización del procedimiento descrito en el documento FR 2 825 803 deja de corresponder a la firma real del buque.
- 60 **[0014]** La invención tiene por lo tanto como objeto dar remedio a este problema proponiendo un procedimiento de determinación de la imanación del casco de un buque que permite obtener, a partir de medidas de campo magnético hechas con ayuda de sensores de a bordo por el buque, una solución que sea robusta y que no esté perturbada por unas fuentes de campo magnético parásito contenidas en el casco del buque.
- 65

5 **[0015]** La invención tiene por lo tanto por objeto un procedimiento de determinación, en tiempo real, de la imanación del casco de un buque, un procedimiento de determinación, en tiempo real, de la firma magnética de un buque, un procedimiento de inmunización magnética de un buque, un dispositivo de determinación, en tiempo real, de la imanación del casco de un buque y un dispositivo de inmunización magnética de un buque según las reivindicaciones.

**[0016]** Los dispositivos precedentes están ventajosamente embarcados a bordo del buque cuya imanación del casco se determina.

10 **[0017]** La invención y sus ventajas se comprenderán mejor con la lectura de la descripción siguiente, determinada únicamente a título de ejemplo, y hecha haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

- la figura 1 es una representación esquemática de la instalación que permite regular la firma de un buque;
- la figura 2 es una representación de una porción del malla del casco y de su malla dual;
- 15 - la figura 3 es una representación en forma de un organigrama del procedimiento de regulación; y,
- las figuras 4 y 5 son unos grafos que dan el valor de la firma para diferentes posiciones longitudinales bajo el casco del buque.

20 Dispositivo

**[0018]** El buque del cual se busca regular la firma magnética comprende un casco 1 que está hecho por ensamblado de chapas. Las chapas utilizadas son de un material ferromagnético caracterizado por una susceptibilidad magnética reversible  $\chi$ .

25 **[0019]** El casco presenta una superficie interior 3, orientada hacia el interior del buque, y una superficie exterior 5, orientada hacia el exterior del buque.

30 **[0020]** El buque lleva a bordo un dispositivo, indicado por la referencia general 6 en la figura 1, de determinación, en tiempo real, de la imanación del casco de un buque. El dispositivo 6 es capaz de realizar los procesos de determinación de la imanación del casco de un buque, y determinación de la firma del buque y de inmunización magnética del buque.

35 **[0021]** El dispositivo 6 comprende una pluralidad de sensores del campo magnético 7. Por ejemplo, 50 sensores están dispuestos en el volumen V2 delimitado interiormente por la superficie interior 3 del casco 1. Los sensores 7 están colocados a proximidad de la superficie interior 3 y, preferentemente, pegados a esta superficie. Desde un punto de vista práctico, se trata de una mezcla entre sensores de dos ejes y tri-ejes. En el caso presente, como los sensores 7 están pegados al casco o, al menos, están muy cerca de este, solamente se consideran las medidas de los componentes de la inducción magnética  $B$  tangentes al casco. Efectivamente, la medida de la componente normal de la inducción magnética  $B$  presenta una relación señal ruido desfavorable e incluirla en las modelizaciones puede resultar catastrófico en términos de convergencia hacia una solución robusta, es decir estable con respecto a las incertidumbres de medida. Como la información añadida por esta componente normal es poco representativa, no se ha tenido en cuenta en el procedimiento según la invención. La posición de cada sensor 7 con respecto al casco es conocida.

45 **[0022]** El dispositivo 6 comprende también una pluralidad de lazos de inmunización 9 de circulación de una corriente eléctrica. Los lazos 9 están hechos de un material conductor de la corriente eléctrica. Los lazos 9 son independientes entre sí. Forman unos circuitos eléctricos de geometría y posicionamiento conocidos con respecto al casco.

50 **[0023]** El dispositivo 6 comprende medios de alimentación con potencia eléctrica 10 capaces de ser controlados para hacer circular corrientes adaptadas en cada uno de los lazos 9 independientemente entre sí.

55 **[0024]** La circulación de una corriente en un lazo 9 genera una excitación magnética  $H$  capaz de inducir una distribución de imanación en el casco 1. Así, los diferentes lazos 9 permiten modificar el valor de la excitación magnética inductora  $H_0$ .

60 **[0025]** El dispositivo 6 comprende un medio 11 de evaluación de la excitación magnética inductora  $H_0$ . Se trata por ejemplo de un medio que permite evaluar, en el instante considerado, a la vez la excitación magnética terrestre en el lugar en que se sitúa el buque, y la excitación magnética inducida por los lazos de inmunización en cada punto del casco del buque.

**[0026]** El dispositivo 6 comprende una unidad de cálculo 13 capaz de llevar acabo las diferentes etapas de los procesos de determinación de la imanación del casco, de determinación de la firma del buque, y de inmunización, descritos en detalle a continuación.

65

**[0027]** Preferentemente, la unidad 13 comprende un procesador 15 y una unidad de memorización 17, tal como una memoria muerta y una memoria viva. Comprende también una interfaz entrada/salida 19 a la cual están conectados los sensores 7, el medio 11, así como los medios de alimentación con potencia eléctrica 10.

5 **[0028]** En cada paso de tiempo, la unidad de cálculo 13 ejecuta un programa informático cuyas instrucciones se memorizan en la unidad de memorización 17.

10 **[0029]** La ejecución de este programa lleva a cabo las diferentes etapas del procedimiento de inmunización magnética del buque, representado de manera esquemática en la figura 3. Este procedimiento comprende las etapas consistentes en:

- a) - adquirir una pluralidad de medidas del campo magnético mediante la pluralidad de sensores;
- b) - evaluar la excitación magnética inductora;
- 15 c) - determinar, resolviendo un sistema de ecuaciones resultante de la modelización de los fenómenos físicos implicados, a partir de la pluralidad de medidas adquiridas y de la excitación magnética inductora evaluada, una distribución de fuentes magnéticas probable en la superficie del casco,
- d) - calcular la firma del buque a partir de la distribución de fuentes magnéticas probable; y,
- 20 e) - controlar los medios de alimentación con potencia eléctrica para hacer circular corrientes adaptadas en los lazos, para modificar la excitación magnética de los inductores y, consecuentemente, regular la firma del buque.

**[0030]** La etapa c) lleva a cabo una modelización de los fenómenos físicos, un modelo virtual del casco del buque para discretizar esta modelización y obtener un sistema de ecuaciones a resolver, y métodos matemáticos de resolución de estas ecuaciones. Primero se presentarán estos elementos.

#### 25 Generalidades

**[0031]** La firma magnética del buque se determina por el conjunto de los valores de la inducción magnética en diferentes puntos de una superficie de referencia. Para un buque de superficie, esta superficie de referencia es una porción de un plano situado bajo el casco, a por ejemplo aproximadamente 10 metros. Para un submarino, esta superficie de referencia es una porción de un cilindro coaxial y exterior al casco sensiblemente cilíndrico.

**[0032]** La inducción magnética en esta superficie de referencia resulta de la superposición, por un lado, de la inducción magnética terrestre y de la inducción magnética creada por los lazos de corriente que equipan al buque y, por otro lado, por la inducción magnética creada por la imanación  $M$  llevada por el casco.

**[0033]** La imanación  $M(P)$  en un punto  $P$  del casco ferromagnético comprende una componente inducida  $M^{ind}$ , proporcional a la excitación magnética total  $H(P)$  en el punto  $P$  ( $M^{ind} = \chi H$ ), y una componente remanente  $M^{rem}$ , resultante de la historia magnética del casco.

**[0034]** La excitación magnética total  $H(P)$  en un punto  $P$  del casco ferromagnético comprende una componente  $H_0$ , llamada inductora, independiente del material, proveniente de la excitación magnética terrestre y de la excitación magnética creada por los diferentes lazos de corriente, y una componente  $H^{red}$ , llamada reducida, dependiente del material, resultante de la imanación  $M(P')$  en todos los otros punto  $P'$  del casco.

**[0035]** La excitación magnética reducida  $H^{red}$  tiene propiedades matemáticas que son análogas a las de un campo electrostático. En particular,  $H^{red}$  deriva de un potencial  $\varphi$  :  $H^{red} = - grad\varphi$

#### Modelo del casco

50 **[0036]** Se considera que el casco es un medio ferromagnético delgado, que se reduce a una superficie  $S$ , de espesor  $e$ .

#### Condiciones de paso a través del casco

55 **[0037]** La característica principal de los materiales ferromagnéticos es su capacidad para canalizar el flujo de la excitación magnética. Esta propiedad se amplifica cuando el espesor del material ferromagnético es reducido con respecto a los otras dimensiones características del material y si la permeabilidad magnética  $\chi$  del material es importante.

60 **[0038]** Verificándose estas condiciones en el caso del casco de un buque, la componente normal  $H_n$  de la excitación magnética total  $H$  es nula, es decir que la excitación magnética total  $H$  en el material se considera como tangente al casco, y su componente tangente  $H_t$  es constante en el espesor del casco.

65 **[0039]** Las condiciones de paso a la primera interfaz entre el material del casco y el volumen situado en el exterior del casco (índice 1 en la figura 1), las condiciones de paso a la segunda interfaz entre el material del casco y el volumen situado en el interior del casco (índice 2 en la figura 1), y la hipótesis de que el casco se reduce a una

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n}$$

superficie  $S$  conducen a escribir la continuidad del potencial  $\varphi$  y la discontinuidad de la derivada normal del potencial  $\varphi$  en el paso de la superficie  $S$ :

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \neq 0$$

Modelización de las fuentes magnéticas

5 **[0040]** La excitación magnética reducida  $H^{red}$  se comporta como un campo electrostático, las fuentes de esta excitación reducida  $H^{red}$  se modelizan o bien mediante unas distribuciones de fuentes monopulares, o bien mediante unas distribuciones de fuentes dipolares, como es conocido por el experto en la materia para modelizar los campos electrostáticos.

10 **[0041]** Las distribuciones de fuentes aceptables deben responder a las condiciones de pasos indicadas más arriba.

Distribución de superficie de cargas

15 **[0042]** La primera distribución que satisface a las condiciones de paso es la distribución superficial de cargas o distribución de fuentes monopulares, indicada  $q(P)$ .

**[0043]** Las condiciones de paso se escriben entonces:

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = -q(P)$$

20 **[0044]** Al paso de la superficie  $S$ , la excitación magnética reducida  $H^{red}$  sigue la ecuación:  $H^{red}_1 - H^{red}_2 = q(P) \cdot \mathbf{n}$ , donde los índices 1 y 2 hacen respectivamente referencia al volumen exterior y al volumen interior delimitado por la superficie  $S$  del casco, y  $\mathbf{n}$  es el vector normal a la superficie  $S$ , en el punto  $P$  de la superficie  $S$ .

25 **[0045]** Esta ecuación vectorial indica que hay conservación de la componente tangencial de la excitación magnética reducida  $H^{red}$ , y salto de su componente normal, a través de la superficie  $S$ .

**[0046]** Esta distribución de fuentes monopulares crea, en un punto  $R$  cualquiera, un potencial reducido y una excitación magnética reducida:

$$\begin{aligned} \varphi(R) &= \frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{q(P)}{|PR|} dS(P) \\ H^{red}(R) &= \frac{1}{4\pi} \iint_S q(P) \frac{PR}{PR^3} dS(P) \end{aligned} \tag{1}$$

30 donde  $P$  es un punto corriente de la superficie  $S$  del casco; y  $PR$  es el vector que une los puntos  $P$  y  $R$ .

Distribución superficial de dipolos tangenciales

35 **[0047]** La superficie  $S$  del casco lleva una distribución superficial de fuentes dipolares, indicada  $\mathbf{p}(P)$  en un punto  $P$  de la superficie  $S$ . Las condiciones de paso para esta distribución se escriben:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = p_n(P)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = -\text{div}_S \vec{p}_t(P)$$

donde  $p_n(P)$  y  $p_t(P)$  representan respectivamente la componente normal y la componente tangencial a la superficie  $S$  de la distribución  $\mathbf{p}(P)$ ; y  $\text{div}_S$  el operador divergencia reducido a la superficie  $S$ .

5 **[0048]** Así, una distribución superficial de fuentes dipolares  $\mathbf{p}(P)$  que son tangenciales a la superficie  $S$  del casco satisface las condiciones de paso a través de la superficie  $S$ . En lo que sigue se omitirá el índice  $t$ .

**[0049]** Al paso de la superficie  $S$ , la excitación magnética reducida  $H^{red}$  sigue la ecuación:

$$H^{red}_1 - H^{red}_2 = -[\text{div}_S \vec{p}(P)] \cdot \vec{n}$$

10 **[0050]** Esta distribución de fuentes dipolares crea, para un punto  $R$  cualquiera, un potencial reducido y una excitación reducida:

$$\begin{aligned} \varphi(R) &= \frac{1}{4\pi} \iint_S \vec{p}(P) \cdot \frac{PR}{PR^3} dS(P) \\ H^{red}(R) &= \frac{1}{4\pi} \iint_S \text{grad}(\vec{p}(P)) \cdot \frac{PR}{PR^3} dS(P) \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $P$  es un punto corriente de la superficie  $S$  del casco; y  $PR$  es el vector que une los puntos  $P$  y  $R$ .

15 Notas

**[0051]** Estas dos distribuciones de fuentes, en carga y en dipolos, representan el mismo fenómeno físico y crean la misma excitación magnética en cualquier punto  $R$ . Ello impone que:  $\text{div}_S \mathbf{p}(P) = -q(P)$

20 **[0052]** Además, un volumen  $\Omega$  imanado crea un potencial que tiene como expresión:

$$\varphi(R) = \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega} M(P) \cdot \frac{PR}{PR^3} d\Omega(P)$$

donde  $M(P)$  es la imanación en un punto  $P$  del material.

25 **[0053]** Siendo la magnitud  $M(P)$  constante a lo largo del espesor  $e$  de la chapa, la integral de volumen puede ser sustituida por una integral superficial. Se pasa de una integral triple sobre el volumen elemental  $d\Omega$  del casco, a una integral doble sobre una superficie elemental  $dS$  (que no es un vector).

30 **[0054]** La comparación de la expresión del potencial en función de  $\mathbf{p}$  y de la expresión del potencial en función de  $M$  conduce a:  $\mathbf{p} = eM$ , mientras que, la relación entre  $\mathbf{p}$  y  $q$  conduce a:  $q = -\text{div}_S M$ .

Modelización continua de los fenómenos físicos

Primera modelización

35

**[0055]** La distribución de imanación  $M(P)$  en el casco, que es la suma de la imanación inducida  $M^{ind}$  y de la imanación remanente  $M^{em}$ , genera una excitación magnética en un punto  $R$  en el aire que adopta, según la ecuación (2), la forma:

$$H(R) = H_0(R) + H^{red}(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega} grad(M(P) \cdot \frac{RP}{RP^3}) d\Omega(P) \quad (3)$$

5 **[0056]** Invertiendo esta relación, la primera modelización, denominada corrientemente modelización del problema inverso, permite determinar la distribución de imanación  $M(P)$ , a partir de una pluralidad de medidas de la excitación magnética en puntos  $R$  determinados y del conocimiento de la excitación magnética inductora  $H_0(R)$ .

Segunda modelización

10 **[0057]** La imanación inducida  $M^{ind}$  en un punto  $P$  del casco es proporcional a la excitación magnética total  $H(P)$  en este punto  $P$ :

$$M^{ind}(P) = \chi H(P)$$

**[0058]** Es decir:

$$M^{ind}(P) = \chi [H_0(P) + \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega} grad(M(P') \cdot \frac{PP'}{PP'^3}) d\Omega(P')] \quad (4)$$

15 **[0059]** Esta relación traduce el comportamiento del material. Acopla la respuesta del material en el punto  $P$ , es decir la imanación inducida  $M^{ind}(P)$  en el punto  $P$ , con la imanación total  $M(P) = M^{ind}(P) + M^{em}(P)$  en cada uno de los otros puntos  $P'$  del casco.

20 Discretización de las modelizaciones primera y segunda

**[0060]** Las distribuciones superficiales de fuentes magnéticas están discretizadas.

25 **[0061]** Para ello, se utiliza un modelo virtual del casco. Este modelo comprende una malla constituida por una pluralidad de superficies elementales que constituyen una aproximación de la superficie  $S$ .

**[0062]** Comprendiendo esta malla  $N$  superficies elementales  $S_i$  poligonales y planas.

30 **[0063]** Cada superficie elemental  $S_i$  está limitada por una pluralidad de aristas  $L_{ij}$ . Las aristas de las diferentes superficies se juntan en  $N'$  nodos  $k$  (cf. figura 2).

Fuentes dipolares

35 **[0064]** La distribución de fuentes dipolares  $p(P)$ , donde  $P$  es un punto corriente de la superficie  $S$  del casco del buque, se considera como uniforme en cada superficie elemental  $S_i$  de la malla. Se escribe  $p_i$ .

**[0065]** Con  $\vec{p}_i = eM_i = eM_i^{ind} + eM_i^{rem} = \vec{p}_i^{ind} + \vec{p}_i^{rem}$ , la discretización de la ecuación (3) conduce a:

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_i^N \iint_{S_i} grad_S(\vec{p}_i(P) \cdot \frac{RP}{RP^3}) dS_i(P)$$

donde  $PR$  es el vector que une el punto  $P$ , de la superficie elemental  $S_i$ , en el punto  $R$ . Con:

$$\iiint_{\Omega_i} \text{grad}(M_i(P) \cdot \frac{PR}{PR^3}) d\Omega_i(P) = \iint_{S_i^{ext}} \text{grad}_s(\bar{p}_i(P) \cdot \frac{PR}{PR^3}) d\bar{S}_i^{ext}(P)$$

**[0066]** Donde  $\Omega_i$  es un volumen elemental del casco obtenido por translación de la superficie elemental  $S_i$  sobre una longitud igual al espesor  $e$  a lo largo de una normal a la superficie elemental  $S_i$ .  $S_i^{ext}$  es la superficie exterior cerrada de este volumen elemental  $\Omega_i$ , orientada del interior hacia el exterior.

5 **[0067]** Considerando las diferentes magnitudes como constantes según el espesor  $e$  del volumen  $\Omega_i$ , la expresión precedente se vuelve:

$$\iint_{S_i} \text{grad}_s(\bar{p}_i(P) \cdot \frac{PR}{PR^3}) dS_i(P) = \sum_j \int_{L_{i,j}} (\bar{p}_i(P) \bar{n}_{i,j}) \frac{PR}{PR^3} dL_{i,j}(P)$$

10 donde  $\bar{n}_{i,j}$  es la normal a lo largo de la arista  $L_{i,j}$ , situada en el plano de la superficie elemental  $S_i$  y orientada hacia el exterior de esta superficie elemental. En lo que sigue, para más claridad, los índices  $j$  en las diferentes aristas de una misma superficie elemental se omiten, de modo que la suma sobre las diferentes integrales lineales se vuelve una integral de contorno. De donde,

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_i^N \int_{L_i} [(\bar{p}_i^{ind}(P) + \bar{p}_i^{rem}(P)) \bar{n}_i] \frac{PR}{PR^3} dL_i(P) \quad (5)$$

O, en forma matricial:

$$(A_M \quad A_M) \begin{pmatrix} \bar{P}_i^{ind} \\ \bar{P}_i^{rem} \end{pmatrix} = m$$

15 Con:

- $m$  un vector cuya  $j$ -ésima componente es la diferencia  $H(R_j) - H_0(R_j)$  entre la medida de la excitación magnética realizada en el punto  $R_j$  donde está colocado el  $j$ -ésimo sensor, y el valor de la excitación magnética inductora en el punto  $R_j$ ; y,
- $A_M$  la matriz cuyo elemento  $A_{Mji}$  es el operador asociado a una superficie elemental

$$S_i : \frac{1}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \bar{n}_i) \frac{R_i R_j}{R R^3} dL_i(R_i).$$

25 **[0068]** Donde  $u_i$  es un doblete de vector que forma una base asociada a la superficie elemental  $S_i$  de descomposición de las  $p_i$

**[0069]** Utilizando la ecuación (4), en un punto  $P$  de la superficie elemental  $S_i$ , se obtiene:

$$\bar{p}_i^{ind}(P) = eM_i^{ind}(P) = e\chi H_{0i} + \frac{\chi}{4\pi} \sum_j^N \iint_{S_j} \text{grad}_s(\bar{p}_j(P') \cdot \frac{PP'}{PP'^3}) dS_j(P')$$

30 donde se ha considerado que la excitación inductora  $H_0(P)$  es uniforme sobre la superficie  $S_i$  y vale  $H_{0i}$ .  
Con

$$\iint_{S_j} \text{grad}_S(\bar{p}_j(P') \cdot \frac{PP'}{PP'^3}) dS_j(P') = \int_{L_j} (\bar{p}_j(P') \cdot \bar{n}_j) \frac{PP'}{PP'^3} dL_j(P'),$$

Se obtiene finalmente:

$$\frac{\bar{p}_i^{ind}(P)}{e} - \frac{\chi}{4\pi} \sum_j \int_{L_j} (\bar{p}_j(P') \cdot \bar{n}_j) \frac{PP'}{PP'^3} dL_j(P') = e\chi H_{0i}$$

Que se puede escribir en forma matricial:

$$(Id + D_M \quad D_M) \begin{pmatrix} \bar{p}_i^{ind} \\ \bar{p}_i^{rem} \end{pmatrix} = S_M$$

5

con:

- $S_M$  un vector cuya  $i$ -ésima componente es proporcional a la excitación magnética inductora  $e\chi H_{0i}$  en un punto de la  $i$ -ésima superficie elemental de la malla; y,
- $D_M$  la matriz cuyo elemento  $D_{Mji}$  es el operador

10

$$-\frac{\chi e}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \bar{n}_i) \frac{R_j R_i}{|R_j R_i|^3} dL_i(R_i),$$

donde  $R_i$  es la posición del baricentro de la superficie elemental  $S_i$ .

15

**[0070]** Estas ecuaciones son vectoriales. Considerando únicamente su proyección en el plano de cada superficie elemental, ello conduce a un sistema de  $2N$  ecuaciones con  $2N$  incógnitas. Estas ecuaciones relativas al comportamiento magnético del material constituyen lo que se denomina la segunda modelización.

Fuentes monopolares

20

**[0071]** En la descripción monopolar, las cargas son sensiblemente proporcionales al flujo magnético que se escapa de la interfaz entre la chapa y el aire. Sin embargo, como la excitación magnética en la chapa está orientada tangencialmente, el flujo magnético tiende a escaparse mayoritariamente por las aristas del modelo de casco. El procedimiento prevé la realización de un balance del flujo magnético en cada una de las aristas de una malla dual asociada a las superficies elementales  $S_i$  de la malla primaria. Los elementos relativos a esta malla dual se indicarán mediante una prima en lo que sigue. La malla dual comprende  $N'$  superficies elementales estando  $S'_k$ , cada una asociada a un nodo  $k$  de la malla primaria.

25

30

**[0072]** Tal como se ha representado en la figura 2, una superficie elemental dual  $S'_k$  está asociada a un nodo de la malla primaria. Cada superficie elemental dual  $S'_k$  se construye a partir de los baricentros de las diferentes superficies elementales  $S_i$  que contienen el nodo  $k$  considerado y los puntos medios de las aristas que parten de este nodo  $i$ .

**[0073]** La carga  $Q_k$  condensada en el nodo  $k$  se define por:

$$Q_k = \iint_{S'_k} q dS'_k$$

35

donde  $S'_k$  es la superficie elemental dual asociada al nodo  $k$  de la malla primaria.

**[0074]** La discretización de la ecuación (1) conduce a:

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_k^{N'} Q_k(R_k) \frac{R_k R}{R_k R^3}$$

[0075] Donde el punto  $R_k$  corresponde a la posición del nodo  $k$ .

5 [0076] Distinguiendo la carga inducida de la carga remanente en la carga total  $Q_k$ , es decir  $Q_k = Q_k^{ind} + Q_k^{rem}$ , se obtiene:

$$H(R) = H_0(R) + \frac{1}{4\pi} \sum_k^{N'} (Q_k^{ind}(R_k) + Q_k^{rem}(R_k)) \frac{R_k R}{R_k R^3} \quad (6)$$

o también, bajo una forma matricial:

$$\begin{pmatrix} A_Q & A_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = m$$

con:

10 -  $m$  un vector cuya  $j$ -ésima componente es la diferencia  $H(R_j) - H_0(R_j)$  entre la medida de la excitación magnética realizada en el punto  $R_j$  donde está colocado el  $j$ -ésimo sensor y el valor de la excitación magnética inductora en el punto  $R_j$ ; y,

$$S'_k : \frac{1}{4\pi} \frac{R_k R_i}{R_k R_i^3}$$

15 -  $A_Q$  la matriz cuyo coeficiente  $A_{Qki}$  es el operador asociado a una superficie elemental dual

[0077] Para la discretización de la segunda modelización que acopla las cargas monopoles entre estas, se obtiene:

$$q = -e \operatorname{div}_S M$$

$$Q_k = \iint_{S'_k} q dS'_k = -e \iint_{S'_k} \operatorname{div}_S M dS'_k$$

$$Q_k^{ind} = -e \iint_{S'_k} \operatorname{div}_S M^{ind} dS'_k$$

[0078] Utilizando la ecuación (4), se obtiene:

$$Q_k^{ind} = -e \iint_{S'_k} \operatorname{div}_S [\chi H_0(P) + \chi H^{red}(P)] dS'_k(P)$$

20 [0079] Luego, introduciendo la ecuación (6) en la ecuación precedente, se obtiene:

$$Q_k^{ind} + \frac{e\chi}{4\pi} \left( \sum_l^{N'} (Q_l^{ind} + Q_l^{rem}) \iint_{S'_k} \operatorname{div}_S \left[ \frac{R_l P}{R_l P^3} \right] dS'_k(P) \right) = -e \iint_{S'_k} \operatorname{div}_S [\chi H_0(P)] dS'_k(P)$$

**[0080]** Finalmente, aplicando la fórmula de Ostogradski a un volumen elemental correspondiente a la extrusión, en un espesor  $e$ , de la superficie elemental  $S'_k$  de la malla dual asociada al nodo  $k$ , es decir:

$$-e \iint_{S'_k} \text{div}_S V dS'_k = -e \int_{L'_k} V \cdot \vec{n}'_k dL'_k$$

donde  $\vec{n}'_k$  es una normal a la arista  $L'_k$  que se sitúa en el plano de la superficie elemental asociada, se obtiene:

$$Q_k^{ind}(R_k) + \frac{e\chi}{4\pi} \left( \sum_l^{N'} (Q_l^{ind}(R_l) + Q_l^{rem}(R_l)) \int_{L'_k} \frac{R_l R_k}{R_l R_k^3} \cdot \vec{n}'_k \cdot dL'_k(R_k) \right) = -e\chi \int_{L'_k} H_0(R_k) \cdot \vec{n}'_k dL'_k(R_k)$$

(7)

5 o bajo una forma matricial:

$$\begin{pmatrix} Id + D_Q & D_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = S_Q^2$$

con:

10 -  $S_Q$  un vector cuya  $k$ -ésima componente se determina mediante la expresión  $-e\chi \int_{L'_k} H_0(R_k) \cdot \vec{n}'_k dL'_k(R_k)$  relativa a la  $k$ -ésima superficie elemental dual  $S'_k$ ; y;

-  $D_Q$  la matriz cuyo coeficiente  $D_{Q_{ij}}$  es el operador  $\frac{e\chi}{4\pi} \int_{L'_j} \frac{R_i R_j}{R_i R_j^3} \cdot \vec{n}'_j \cdot dL'_j(R_j)$ .

Ecuaciones a resolver

15 **[0081]** De manera sintética, las ecuaciones a resolver son las siguientes:

$$\begin{pmatrix} A_M & A_M \\ D_M + Id & D_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_i^{ind} \\ P_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_M \end{pmatrix} \tag{A}$$

en la descripción con fuentes dipolares:

**[0082]** En la descripción con fuentes monopoles:

$$\begin{pmatrix} A_Q & A_Q \\ D_Q + Id & D_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_Q \end{pmatrix} \tag{B}$$

20 **[0083]** La solución de estos sistemas de ecuaciones no es única puesto que, en la mayor parte de los casos, el número de sensores utilizados (es decir el número de coordenadas del vector  $m$ ) es menos importante que el número de fuentes buscadas (i.e.  $N$  fuentes dipolares y  $N$  fuentes monopoles). Para obtener una solución, se utiliza un proceso de descomposición en valores singulares (acrónimo SVD en inglés). Esta herramienta matemática, conocida por el experto en la materia, permite determinar, entre todas las soluciones posibles, la solución de norma mínima. Preferentemente se utiliza una norma cuadrática en este proceso de descomposición en valores singulares.

25 **[0084]** Una vez obtenida la solución, se evalúa el campo magnético sobre la superficie de referencia mediante las ecuaciones (5), sistema de ecuaciones (A), o (6), sistema de ecuaciones (B).

30 Transformación de paso de la descripción en fuentes dipolares a la descripción en fuentes monopoles

**[0085]** Según el procedimiento del estado de la técnica, se resuelve un sistema de ecuaciones conforme a uno u otro de los sistemas de ecuaciones (A) y (B). La solución obtenida es relativamente precisa en el caso en que los sensores del campo magnético están suficientemente alejados del casco del buque. En el caso contrario, en que los

sensores están cerca o pegados al casco del buque, la solución obtenida está falseada y por lo tanto no es satisfactoria.

5 **[0086]** El procedimiento según la invención resuelve otro sistema de ecuaciones (C). El sistema de ecuaciones (C) deriva de la combinación de los dos sistemas de ecuaciones (A) y (B), para modelizar de manera precisa y robusta a la vez el aspecto vectorial del problema, en particular la conexión entre las medidas del campo magnético y las fuentes, y el aspecto escalar del problema, en particular el acoplamiento mutuo entre las fuentes en la superficie del casco. La solución obtenida mediante la resolución del sistema de ecuaciones (C) es precisa, incluso cuando los

10 **[0087]** Para ello, el procedimiento según la invención utiliza una transformación  $T$  que permite pasar de la distribución de fuentes dipolares  $\mathbf{p}_i$  a la distribución de fuentes monopoles  $Q_k$ :  $(Q_k)=T(\mathbf{p}_i)$ . Con:

$$Q_k = \iint_{S'_k} q(P) dS'_k(P) \text{ et } q(P) = -\text{div}_s \vec{p}(P)$$

**[0088]** Se demuestra que:

$$Q_k = \sum_l^{d_k} \vec{p}_l \cdot \int_{L'_{k,l}} \vec{n}'_{k,l} dL'_{k,l}(P) \quad (7)$$

15 donde:

- $d_k$  es el número de aristas duales  $L'_{k,l}$  asociadas a la superficie elemental dual  $S'_k$  del nodo  $k$ ;
- $\vec{n}'_{k,l}$  la normal que sale en la arista dual  $L'_{k,l}$  considerada; y,
- 20 -  $\mathbf{p}_i$  el valor de la imanación dipolar tangencial a lo largo de la arista dual  $L'_{k,l}$  considerada, siendo esta imanación constante a lo largo de una arista dual y correspondiente a la imanación de la superficie elemental  $S_i$  sobre la cual se encuentra la arista dual considerada.

25 **[0089]** Aplicando la relación (7) a todos los elementos de la malla, se obtiene una matriz  $T$  que permite pasar de la distribución en fuentes dipolares a la distribución en fuentes monopoles:  $(Q_k)=T(\mathbf{p}_i)$

**[0090]** Los coeficientes de la matriz  $T$  dependen de la geometría de la malla primaria escogida.

30 **[0091]** La pseudo-inversa  $T^*$  de la transformación  $T$ , es decir la generalización de la matriz inversa a las matrices que no son cuadradas, permite pasar de la distribución en fuentes monopoles a una distribución de fuentes dipolares:  $(\mathbf{p}_i) = T^*(Q_j)$ .

**[0092]** Utilizando, además, la transformación  $T$  únicamente para las imanaciones remanentes, el sistema de ecuaciones (C) se escribe:

$$\begin{pmatrix} A_M & A_M \cdot T^* \\ D_M + Id & D_M \cdot T^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{P}_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_M \end{pmatrix} \quad (C)$$

35 con:

- $m$  el vector cuya  $i$ -ésima componente es la diferencia  $H(R_j)-H_0(R_j)$  entre la medida de la excitación magnética realizada en el punto  $R_j$  por el  $i$ -ésimo sensor de campo magnético y el valor de la excitación magnética inductora en el punto  $R_j$ ;

$$\frac{1}{4\pi} \int_{L_i} (\mathbf{u}_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_i R_j}{|R_i R_j|^3} dL_i(R_i)$$

- $A_M$  la matriz cuyo elemento  $A_M ij$  es el operador asociado a una superficie elemental  $S_i$  de la malla primaria, que tiene una pluralidad de aristas  $L_i$ , que presentan cada una una normal  $\vec{n}_i$  en el plano de la superficie elemental  $S_i$  que está orientada hacia el exterior de esta superficie elemental, y donde  $\mathbf{u}_i$  es un doblete de vector que forma una base de descomposición de la superficie elemental  $S_i$ ;
- 45 -  $S_M$  el vector cuya  $i$ -ésima componente es proporcional a la excitación magnética inductora  $\chi H_0 i$  en un punto de la  $i$ -ésima superficie elemental  $S_i$  de la malla; y,

-  $D_M$  la matriz cuyo elemento  $D_{Mij}$  es el operador 
$$-\frac{\chi e}{4\pi} \int_{L_j} (u_j \cdot \vec{n}_j) \frac{R_i R_j}{|R_i R_j|^3} dL_j(R_j) ;$$
 y,  
 -  $T$  la matriz de transformación, tal que 
$$(Q_i^{rem}) = T (\vec{p}_i^{rem}),$$
 cuya pseudo-inversa se indica como  $T^*$ .

5 **[0093]** Primero se eliminan las incógnitas  $\vec{p}_i^{ind}$  del sistema. Se obtiene:

$$(\vec{p}_i^{ind}) = (D_M + Id)^{-1} \cdot (S_M - D_M T^*) (Q_i^{rem}) \quad (8)$$

y, consecuentemente:

$$(Q_i^{rem}) = ((-A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} \cdot D_M + A_M) T^*)^* \cdot (m - A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} S_M) \quad (9)$$

10 **[0094]** Un sistema de ecuaciones similar podría escribirse a partir de las  $A_Q$  y de las  $D_Q$  del sistema de ecuaciones (B).

Reequilibrado del peso de las fuentes

15 **[0095]** Para dar el mismo peso a todas las superficies elementales de la malla primaria durante la resolución del sistema de ecuaciones (C), y con el fin de no sesgar la solución favoreciendo una superficie elemental que se sitúa frente a un sensor 7 del campo magnético con respecto a las otras superficies elementales de la malla primaria, el procedimiento según la invención prevé un proceso de reequilibrado del sistema de ecuaciones (C).

20 **[0096]** Para ello, se utiliza un proceso, por otro lado conocido de por sí, de pre-acondicionamiento de las matrices rectangulares.

25 **[0097]** De una manera general, sea  $A$  una matriz cualquiera rectangular. Se denominan  $W_g$  y  $W_d$  las matrices cuadradas diagonales cuyos términos son respectivamente los inversos de las normas de las filas y de las columnas de  $A$ . La matriz  $A_1$  se define entonces mediante:  $A_1 = W_g \cdot A \cdot W_d$

**[0098]** Este proceso tiende a disminuir le influencia de los coeficientes más importantes de la matriz  $A$ .

30 **[0099]** En el caso de la ecuación (9), el proceso de pre-acondicionamiento se aplica, preferentemente, a la matriz -  $A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} \cdot D_M + A_M) T^*$ .

**[0100]** Aplicando el proceso de pre-acondicionamiento a este último conjunto de ecuaciones, se obtiene:

$$(Q_i^{rem}) = W_d (W_g \cdot ((-A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} \cdot D_M + A_M) T^* \cdot W_d)^* \cdot W_g \cdot (m - A_M \cdot (D_M + Id)^{-1} S_M)$$

35 **[0101]** Las incógnitas  $Q_i^{rem}$  se obtienen mediante la expresión precedente, luego se calculan las incógnitas  $\vec{p}_i^{ind}$  a partir de la ecuación (8).

**[0102]** Finalmente, el campo magnético creado por el casco del buque en el plano de referencia se calcula mediante

la parte correspondiente de la ecuación (6) para la contribución de las fuentes monopoles remanentes  $Q_i^{rem}$  y mediante la parte correspondiente de la ecuación (5) para la contribución de las fuentes dipolares

40 inducidas  $\vec{p}_i^{ind}$ .

**[0103]** Las etapas anteriores del procedimiento de determinación de la imanación del casco del buque y del procedimiento de determinación de la firma del buque constituyen las etapas necesarias de un procedimiento de inmunización magnética del buque consistente en regular, en tiempo real, la firma magnética del buque.

5 **[0104]** Para regular la firma magnética del buque, preferentemente para minimizar la firma magnética del buque, los medios de cálculo del buque determinan una pluralidad de corrientes eléctricas adaptadas destinadas a ser respectivamente aplicadas a los lazos de inmunización de los que está dotado el buque.

10 **[0105]** Los medios de cálculo transmiten estas corrientes eléctricas adaptadas como consignas a los medios de alimentación de los diferentes lazos de inmunización. Los medios de alimentación aplican a la entrada de cada uno de los lazos una corriente correspondiente a la corriente adaptada requerida.

15 **[0106]** Por ello, las corrientes que circulan por los diferentes lazos de inmunización que generan una excitación magnética inductora modifican la excitación magnética total  $H_0$ .

20 **[0107]** Una vez establecidas las corrientes eléctricas, se ejecuta de nuevo el procedimiento de determinación de la imanación del casco del buque considerando esta modificación de la excitación magnética  $H_0$ , para determinar un nuevo valor de la imanación. Luego se itera el procedimiento de determinación de la firma del buque con el nuevo valor probable de la distribución de la imanación en la superficie del casco.

**[0108]** Por iteraciones sucesivas, se minimiza la firma magnética del buque.

25 **[0109]** Por otro lado, en una variante de realización del procedimiento de determinación de la imanación, se modifica el proceso de descomposición en valores singulares (SVD). En una SVD clásica, se busca una solución que minimice un criterio predefinido que utiliza una norma, tal como « los mínimos cuadrados ». En la presente variante de realización, se busca una solución cuya separación con una solución de referencia minimice el criterio escogido.

30 **[0110]** Esta distribución de referencia es ventajosamente la distribución de norma mínima determinada durante una iteración precedente del procedimiento de determinación de la imanación.

**[0111]** Esta distribución de referencia puede también ser una distribución de fuentes magnéticas medida mediante un dispositivo adaptado a un momento de la historia magnética del buque. Esta medida puede por ejemplo realizarse en un astillero, antes de que el buque entre en el mar, mediante un dispositivo fijo.

35 **[0112]** De esta manera, se transcribe la idea de que entre los instantes  $t-\delta t$  y  $t$ , la distribución de imanación en la superficie del casco ha evolucionado a partir de la distribución de imanación en  $t - \delta t$ , es decir la distribución de referencia, y que la distribución en el instante  $t$  no debe estar muy « alejada » de la distribución de referencia.

40 **[0113]** Hay que destacar que esta variante del procedimiento de determinación de la imanación del casco es independiente del sistema de ecuaciones que se quiere resolver. Podría ser realizado para otros sistemas de ecuaciones tales como los sistemas (A) o el sistema (B).

45 **[0114]** Esta variante presenta la ventaja de conducir a una distribución de imanación de norma mínima más robusta que en el proceso de descomposición en valores singulares clásicamente utilizado. Hay que destacar que se ha constatado que la solución obtenida mediante la realización de la presente invención es mucho más robusta que las soluciones obtenidas por los métodos de resolución del estado de la técnica, y esto cualquiera que sea la distancia a la cual se encuentran los sensores de la superficie del casco ferromagnético. Por « robusta », se entiende clásicamente el hecho de que la solución no se modifique o lo haga apenas por unas perturbaciones o ruidos.

50 **[0115]** La realización del procedimiento de determinación de la imanación del casco de un buque según la presente invención se ha realizado sobre una maqueta escala 1/30 de un submarino de doble casco.

55 **[0116]** Las figuras 4 y 5 son unos grafos que permiten comparar la firma del casco calculada según el proceso del estado de la técnica y según el procedimiento de la invención con la firma real medida por un sensor. La firma se evalúa aquí a lo largo de un eje paralelo al eje longitudinal del casco y situado 10 metros por debajo de esta, correspondiendo la posición 0 a la vertical del centro de gravedad del casco. El grafo de la figura 4 representa la componente longitudinal del campo magnético mientras que el grafo de la figura 5 representa la componente vertical de este mismo campo. Los sensores del campo magnético están pegados a la pared exterior del casco interno del submarino. Se constata una correlación muy elevada entre la firma calculada según la presente invención y la firma real del buque.

60

65 **[0117]** Como el procedimiento según la invención permite calcular con precisión la firma acercando los sensores del casco, estos están ventajosamente dispuestos en el exterior del casco ferromagnético del buque. Por ejemplo, en el caso de un submarino que comprende un casco interno ferromagnético y un casco externo hidrodinámico, los sensores están ventajosamente colocados entre los dos cascos. Esta disposición permite reducir, en el interior del casco interno, la ocupación de espacio causado por los sensores y sus conexiones eléctricas. Además, como el

casco interno constituye un blindaje magnético, permite reducir considerablemente, incluso anular, en el exterior de este, los campos magnéticos secundarios generados por las fuentes secundarias interiores, tales como los motores. Las medidas de campo magnético realizadas por unos sensores situados en el exterior del casco interno se acercan aún más al campo magnético de interés, es decir el campo magnético generado por la distribución de imanación en la superficie del casco. La solución a la cual conduce el procedimiento según la invención es aún más justa.

5

**[0118]** En el sentido de la invención, los términos « cerca del casco » o « pegado al casco » aplicados a un sensor de campo magnético significa que el elemento sensible al campo magnético de este sensor está colocado entre 0 y 10 cm de la superficie orientada hacia el exterior del buque o de la superficie orientada hacia el interior del buque del casco ferromagnético del cual se busca calcular la firma.

10

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de determinación, en tiempo real, de la imanación del casco de un buque, siendo el casco del buque de material ferromagnético y estando sometido a una excitación magnética inductora y estando el buque provisto de una pluralidad de sensores del campo magnético posicionados en puntos determinados con respecto al casco, que comprende las etapas consistentes en:
- a) - adquirir una pluralidad de medidas del campo magnético mediante la pluralidad de sensores;
  - b) - evaluar la excitación magnética inductora; y,
  - c) - determinar, resolviendo un sistema de ecuaciones resultante de la modelización de los fenómenos físicos implicados, a partir de la pluralidad de medidas adquiridas y de la excitación magnética inductora evaluada, una distribución de fuentes magnéticas probable en la superficie del casco, **caracterizado por el hecho de que**, en dicha modelización, las fuentes magnéticas inducidas se describen mediante una distribución de fuentes dipolares y las fuentes magnéticas remanentes se describen mediante una distribución de fuentes monopolares, **y por el hecho de que** dicha modelización comprende:
    - una primera modelización que asocia a unas medidas del campo magnéticas, una distribución de imanación en el material ferromagnético; y,
    - una segunda modelización relativa al comportamiento del material ferromagnético, que describe el acoplamiento entre una fuente magnética en un punto del material, con una fuente magnética en otro punto del material.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado por el hecho de que** el procedimiento utiliza una transformación  $T$  que permite asociar a una distribución de fuentes dipolares al menos una distribución de fuentes monopolares y/o una transformación  $T^*$  que permite asociar a una distribución de fuentes monopolares, al menos una distribución de fuentes dipolares.
3. Procedimiento según la reivindicación 2, **caracterizado por el hecho de que** dicha modelización utiliza un modelo virtual del casco del buque que comprende una malla primaria constituida por una pluralidad de superficies elementales planas y poligonales.
4. Procedimiento según la reivindicación 3, **caracterizado por el hecho de que**, por superficie elemental de la malla primaria, la distribución de fuentes dipolares es uniforme y tangente a este elemento de superficie.
5. Procedimiento según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, **caracterizado por el hecho de que** la distribución de fuentes monopolares está discretizada en los nodos de la malla primaria.
6. Procedimiento según las reivindicaciones 4 y 5 combinadas, **caracterizado por el hecho de que** dicho sistema de ecuaciones a resolver se escribe:

$$\begin{pmatrix} A_M & A_M T^* \\ D_M + Id & D_M T^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_i^{ind} \\ Q_i^{rem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ S_M \end{pmatrix}$$

- con:
- $m$  un vector cuya  $i$ -ésima componente es la diferencia  $H(R_i) - H_0(R_i)$  entre la medida de la excitación magnética realizada en el punto  $R_j$  por el  $i$ -ésimo sensor de campo magnético y el valor de la excitación magnética inductora en el punto  $R_j$ ;

$$\frac{1}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_i R_j}{|R_i R_j|^3} dL_i(R_i)$$

- $A_M$  una matriz cuyo elemento  $A_{Mji}$  es el operador asociado a una superficie elemental  $S_i$  de la malla primaria que tiene una pluralidad de aristas  $L_i$ , que presentan cada una una normal  $n_i$  en el plano de la superficie elemental  $S_i$  y orientada hacia el exterior de esta superficie elemental, y donde  $u_i$  es un doblete de vector que forma una base de la superficie elemental;

- $S_M$  un vector cuya  $i$ -ésima componente es proporcional a la excitación magnética inductora  $e |H_0|$  en un punto de la  $i$ -ésima superficie elemental de la malla primaria;

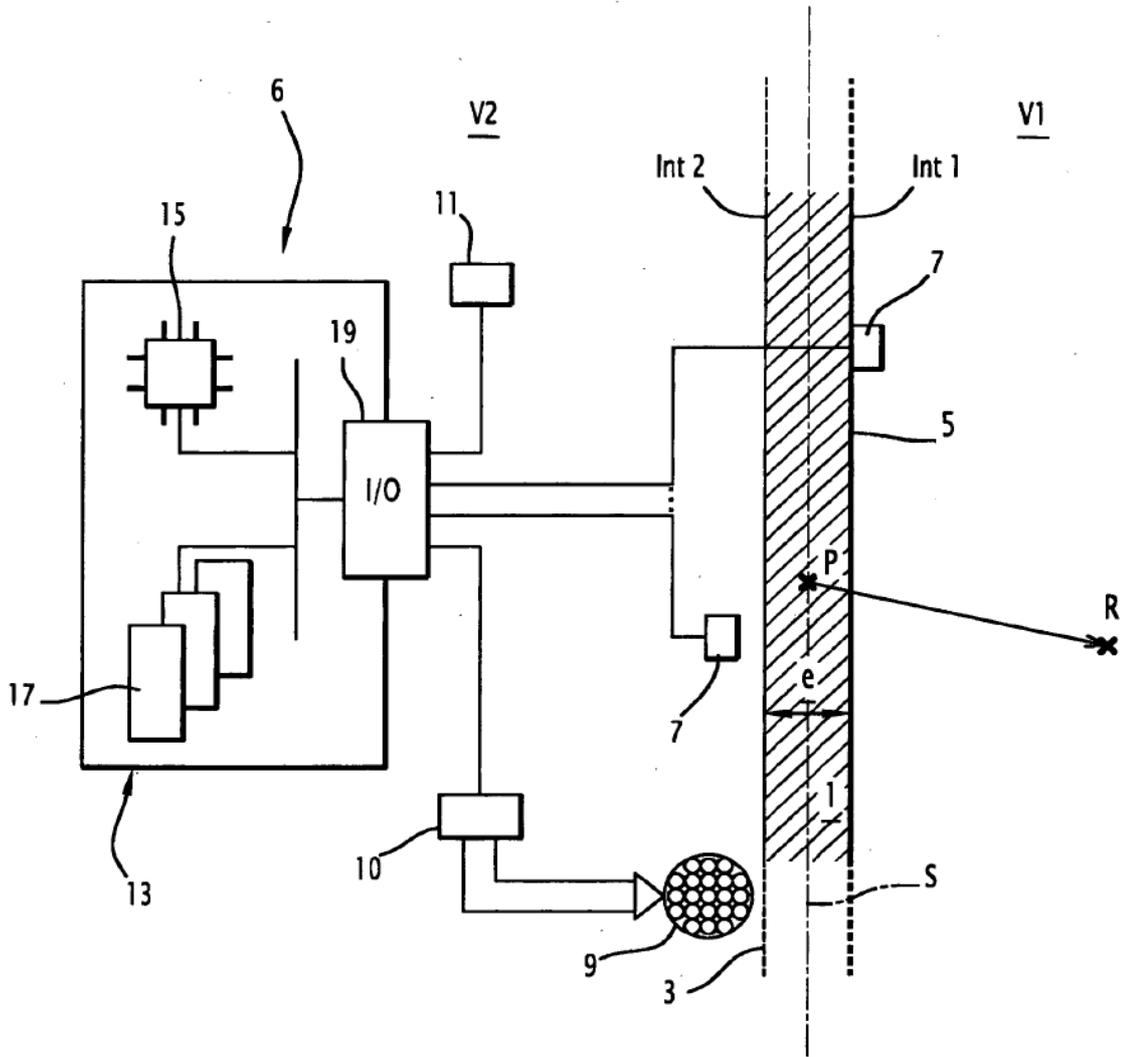
$$-\frac{\chi e}{4\pi} \int_{L_i} (u_i \cdot \vec{n}_i) \frac{R_j R_i}{|R_j R_i|^3} dL_i(R_i) ;$$

- $D_M$  una matriz cuyo elemento  $D_{Mji}$  es el operador y,

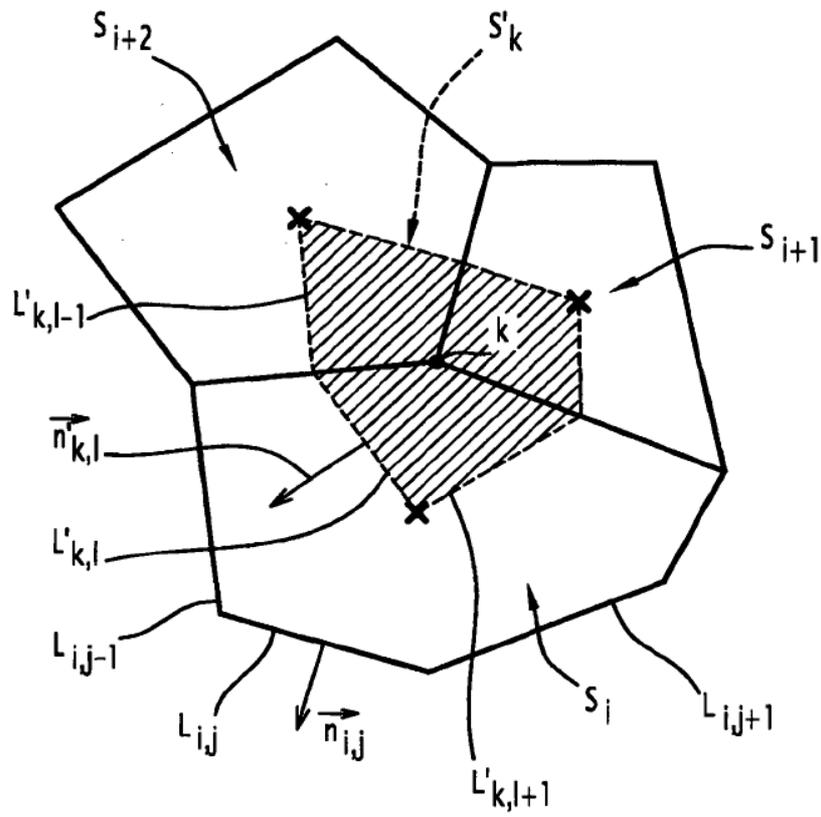
$$(Q_i^{rem}) = T (\vec{p}_i^{rem}),$$

- $T$  una matriz de transformación tal que cuya pseudo-inversa se indica como  $T^*$ .

- 5 7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por el hecho de que** la determinación de la distribución de fuentes magnéticas probable hace intervenir un proceso de pre-acondicionamiento.
8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por el hecho de que** la determinación de la distribución de fuentes magnéticas probable hace intervenir un proceso de descomposición en valores singulares.
- 10 9. Procedimiento de determinación, en tiempo real, de la firma magnética de un buque, **caracterizado por el hecho de que** comprende una etapa de determinación, en tiempo real, de la imanación del casco del buque por el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 que permite obtener una distribución de fuentes magnéticas probable en la superficie del casco, luego una etapa suplementaria consistente en calcular la firma del buque a partir de dicha distribución de fuentes magnéticas probable.
- 15 10. Procedimiento de inmunización magnética de un buque, **caracterizado por el hecho de que**, estando el buque provisto de una pluralidad de lazos de inmunización que tienen geometrías determinadas con respecto al casco del buque y medios de alimentación con potencia eléctrica capaces de ser controlados para hacer circular en los lazos de inmunización, independientemente unos de otros, corrientes adaptadas, el procedimiento comprende, además de las etapas del procedimiento de determinación, en tiempo real, de la firma del buque según la reivindicación 9, una etapa consistente en calcular las diferentes corrientes a hacer circular en los lazos de inmunización para modificar la firma magnética del buque, y una etapa consistente en controlar los medios de alimentación con potencia eléctrica para hacer circular, en los lazos de inmunización, dichas corrientes calculadas.
- 20 11. Dispositivo (6) de determinación, en tiempo real, de la imanación del casco (1) de un buque, siendo el casco del buque en un material ferromagnético sometido a una excitación magnética inductora ( $H_0$ ), **caracterizado por el hecho de que** comprende:  
 - una pluralidad de sensores de campo magnético (7) posicionados en puntos determinados con respecto al casco;  
 - medios de determinación de la excitación magnética inductora; y,  
 30 - una unidad de cálculo (13) conectada con la pluralidad de sensores y con los medios de determinación de la excitación magnética inductora, capaz de ejecutar las instrucciones de un programa de ordenador para la realización de un procedimiento de determinación, en tiempo real, de la imanación del casco de un buque según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 o de un procedimiento de determinación, en tiempo real, de la firma de un buque según la reivindicación 9.
- 35 12. Dispositivo según la reivindicación 11, **caracterizado por el hecho de que** al menos un sensor de la pluralidad (7) de sensores está pegado al casco (1).
- 40 13. Dispositivo según la reivindicación 11 o la reivindicación 12, **caracterizado por el hecho de que** al menos un sensor de la pluralidad de sensores (7) es un sensor de dos ejes que mide los componentes del campo magnéticos tangentes al casco (1).
- 45 14. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, **caracterizado por el hecho de que** al menos un sensor de la pluralidad de sensores (7) está colocado en el exterior del casco (1) del buque.
- 50 15. Dispositivo de inmunización magnética de un buque del tipo que comprende una pluralidad de lazos de inmunización que tienen geometrías determinadas con respecto al casco (1) del buque, medios de alimentación con potencia eléctrica (10) de los lazos de inmunización, y medios de control de los medios de alimentación con potencia eléctrica de los lazos de inmunización, **caracterizado por el hecho de que** los medios de control comprenden un dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14 capaz de calcular, en tiempo real, la firma del buque.
16. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 15, **caracterizado por el hecho de que** se lleva a bordo del buque cuya imanación del casco se determina.



**FIG.1**



**FIG.2**

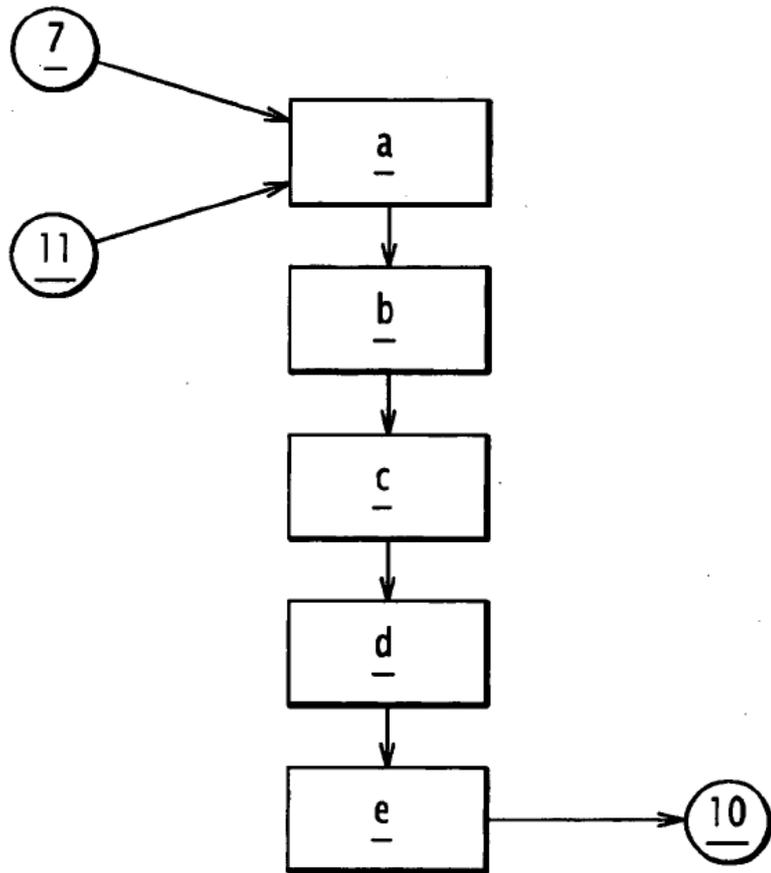
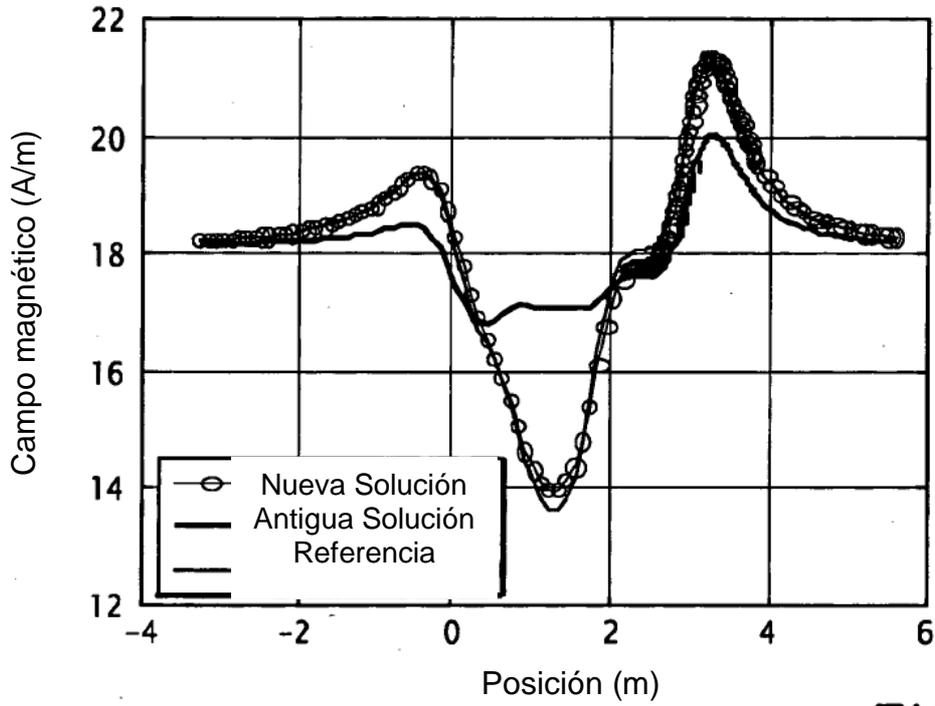


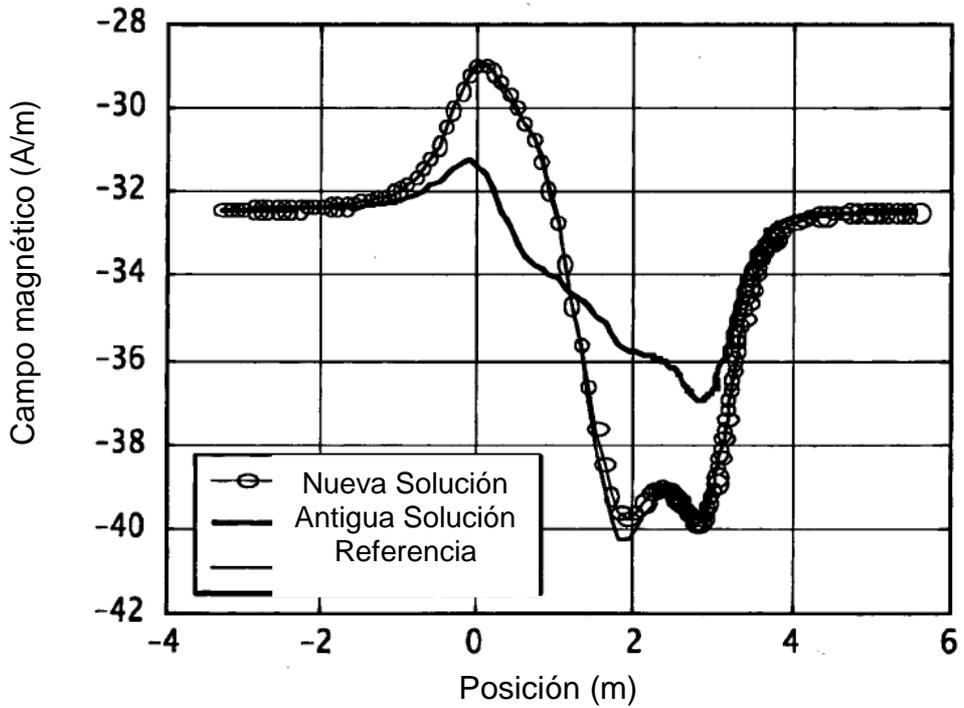
FIG.3

Comparación de las firmas externas: componente longitudinal



**FIG.4**

Comparación de las firmas externas: componente vertical



**FIG.5**