

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 009 470**

51 Int. Cl.:

G01N 27/87

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.04.2022** **PCT/EP2022/059537**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.10.2022** **WO22214694**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.04.2022** **E 22722174 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.11.2024** **EP 4189379**

54 Título: **Método y sistema para detectar y/o monitorizar el crecimiento de defectos**

30 Prioridad:

09.04.2021 EP 21167728

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

27.03.2025

73 Titular/es:

VILLARI HOLDING B.V. (100.00%)
Oostsingel 209
2612 HL Delft, NL

72 Inventor/es:

BAAS, OLIVIER CONSTANT ORESTES

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 3 009 470 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

Método y sistema para detectar y/o monitorizar el crecimiento de defectos

La invención se refiere a un método de detección y/o monitorización de la formación y/o el crecimiento de grietas o deformación plástica, y/o grietas y/o deformación plástica sospechosas en estructuras ferromagnéticas, tales como estructuras de ingeniería civil y marinas, que comprende leer valores de fuga de flujo magnético (MFL) de una pluralidad de magnetómetros, colocados sobre o cerca de un defecto o un defecto sospechoso, y almacenar los valores de fuga de flujo magnético (MFL), típicamente en una memoria que es parte de y/o accesible a través de un controlador u ordenador, según la reivindicación 1.

La evaluación no destructiva (NDE) se usa ampliamente para inspeccionar objetos, tales como barcos, estructuras en el mar, dispositivos de energía renovable, por ejemplo, molinos de viento, puentes, edificios, grúas, ferrocarriles, automóviles, maquinaria y tuberías, para detectar defectos y daños debidos a corrosión y desgaste. Los defectos incluyen grietas, inclusiones, falta de fusión, penetración incompleta y porosidades. Uno de los métodos de NDE se basa en la denominada fuga de flujo magnético (MFL) en las inmediaciones de un defecto.

Un método conocido que se basa en la MFL es la inspección por partículas magnéticas (MPI) para la detección de defectos. Este método, no obstante, necesita la presencia y el juicio subjetivo de un inspector. Por lo tanto, se prefiere llevar a cabo mediciones de MFL usando magnetómetros, tales como los basados en el efecto Hall.

Como se explica en Van der Horst, M. (2018), "On self magnetic flux leakage [SMFL] in support of fatigue crack monitoring in ship and offshore structures: A numerical, experimental, and full-scale application study.", se necesita una inspección regular con el fin de confirmar la integridad estructural adecuada a lo largo de toda la vida útil de una estructura. Las grietas por fatiga detectadas que son demasiado largas para una operación segura necesitan ser reparadas. Las grietas detectadas de longitud aceptable necesitan ser inspeccionadas al menos con más frecuencia. Estas inspecciones son costosas, requieren mucho tiempo y son peligrosas, por lo que, si es posible, se han de evitar inspecciones adicionales además de las inspecciones regulatorias periódicas.

En Van der Horst, se menciona que "El sistema de monitorización de grietas previsto consistiría en matrices de sensores de efecto Hall que se colocan sobre las grietas detectadas, de modo que su propagación se pueda monitorizar sin inspecciones adicionales. Los sensores de efecto Hall necesitan ser colocados a una altitud óptima por encima de la superficie metálica, equilibrando entre la sensibilidad del sensor y los costes asociados, y la densidad espacial de sensores requerida para una caracterización precisa de la longitud de la grieta. En principio, una grieta se puede monitorizar siempre que esté debajo de la matriz de sensores. No obstante, la dependencia de la longitud de la grieta del SMFL crea oportunidades para estimar la longitud de la grieta incluso cuando se ha propagado fuera de la matriz de sensores".

Un objeto de la presente invención es proporcionar un método mejorado de detección y/o monitorización del crecimiento de defectos.

Con este fin, el método según la invención se caracteriza como se define en la reivindicación 1.

La lectura de valores, por ejemplo, una lectura actual o más reciente, contiene típicamente poca o insuficiente información al menos en el sentido de que no proporciona una ubicación precisa de un punto singular, tal como la punta de una grieta, en el que se propaga o se forma el defecto. Se encontró que el procesamiento de los valores de MFL de una lectura actual con los valores de MFL de una lectura anterior, tal como una lectura inicial o de referencia o la lectura anterior, mejora significativamente la precisión de los datos relacionados con la ubicación de un punto singular, en particular la punta de la grieta, en la lectura actual y en muchos casos incluso permite localizar el punto singular cuando esto era imposible con los métodos existentes.

Los defectos pueden ser defectos de rotura de superficie, también conocidos como defectos de superficie o imperfecciones de superficie, y/o defectos de rotura no de superficie, también conocidos como defectos de subsuperficie o imperfecciones incrustadas. Ejemplos de defectos incluyen grietas, deformación plástica (que a menudo es una indicación o un precursor de una grieta), corrosión y picaduras. Los defectos sospechosos incluyen indicaciones de que está presente un defecto e incluyen defectos probables o esperados, tales como ubicaciones críticas en estructuras que podrían contener un defecto o donde es probable que se forme u origine un defecto.

Para permitir una distinción más precisa entre efectos globales, tales como cambios de temperatura, expansión de materiales y variaciones en el campo magnético (de fondo), por una parte, y cambios locales (más pequeños), tales como el crecimiento de defectos, por otra, se prefiere que el sistema comprenda al menos 3 magnetómetros, preferiblemente al menos 5 magnetómetros, preferiblemente al menos 10 magnetómetros, preferiblemente al menos 20 magnetómetros, y/o que la distancia entre la mayoría de, preferiblemente todos, los magnetómetros sea igual.

La frecuencia de la lectura de los valores depende de las circunstancias, por ejemplo, la tasa de propagación esperada o la naturaleza de la estructura, es decir, una tasa esperada más alta y estructuras más críticas podrían necesitar lecturas más frecuentes. En general, las lecturas más frecuentes, por ejemplo, una o más lecturas por día o por hora, generan más datos y generalmente se prefieren. A medida que las baterías mejoran, será más sencillo

implementar frecuencias más altas. Con tasas esperadas bajas y/o estructuras no críticas, las lecturas pueden ser menos frecuentes, por ejemplo, semanalmente, mensualmente o incluso trimestralmente.

Como se mencionó, los magnetómetros se colocan sobre el defecto (sospechoso) o cerca del defecto (sospechoso), por ejemplo, a menos de 200 mm, preferiblemente a menos de 100 mm, preferiblemente a menos de 50, por ejemplo, a menos de 10 mm del defecto (sospechoso).

En una realización, los valores comprenden datos de MFL en dos o más direcciones, preferiblemente al menos en una dirección a lo largo del defecto (siempre que, por supuesto, se pueda determinar la dirección) y en una dirección perpendicular a la superficie de la estructura ferromagnética sobre la que se colocan los magnetómetros.

En una realización, el método comprende los pasos de comparar conjuntos de valores de MFL en diferentes direcciones, seleccionar al menos un conjunto y determinar la ubicación de un punto singular del defecto (sospechoso) a partir del conjunto seleccionado.

Si se leen valores en dos o más, por ejemplo, tres direcciones, en caso de defectos de rotura de superficie, tales como grietas, preferiblemente al menos en una dirección a lo largo del defecto (dirección Y), perpendicular a la superficie de la estructura ferromagnética (dirección X) y perpendicular a las otras dos (dirección Z), y se procesa, al menos una señal, es decir, un conjunto de valores leídos/medidos con una pluralidad de magnetómetros en una dirección particular, por ejemplo, a lo largo del defecto, proporcionará típicamente un cambio más claro en el signo, en particular de positivo a negativo, o dirección (pico) que el otro u otros. Esta señal se selecciona entonces para determinar la ubicación de un punto singular.

La combinación de valores de lectura en dos o más, por ejemplo, tres direcciones, y la disposición de los magnetómetros en una sola dimensión, tal como una línea, en particular una línea recta, proporciona unos medios relativamente compactos pero eficaces para detectar y/o monitorizar la formación y/o el crecimiento de defectos, en particular grietas o deformación plástica.

Los valores de fuga de flujo magnético (MFL) se leen de manera pasiva, leyendo la magnetización inducida por tensión (también conocida como efecto magnetoelástico o de Villari) y/o el campo magnético de la Tierra, que están disponibles de manera natural como fuente u origen de magnetismo.

En una realización, el procesamiento de los valores de la lectura adicional con los valores de la lectura anterior implica al menos uno de los pasos de cálculo, preferiblemente para magnetómetros individuales, preferiblemente para cada uno de los magnetómetros individualmente, de un promedio móvil (ponderado) de lecturas en diferentes momentos en el tiempo, una derivada, una diferencia, un error cuadrático medio (ponderado), un error de mínimos cuadrados (ponderado), un cruce por cero o filtrado de ruido similar, y de procesamiento de reducción de señal, de tales lecturas.

En un ejemplo preferido, los valores de la lectura anterior se restan de los valores de la lectura adicional.

La invención se puede llevar a cabo, por ejemplo, mediante un sistema para detectar y/o monitorizar el crecimiento de defectos, en particular grietas, en estructuras ferromagnéticas, tales como estructuras de ingeniería civil y marinas, que comprenden una pluralidad de magnetómetros y medios, tales como un controlador, para llevar a cabo el método descrito anteriormente.

Para permitir una distinción más precisa entre efectos globales, tales como cambios de temperatura, expansión de materiales y variaciones en el campo magnético (de fondo), por una parte y cambios locales (más pequeños), tales como crecimiento de defectos, por otra, se prefiere que el sistema comprenda al menos 3 magnetómetros, al menos 5 magnetómetros, preferiblemente al menos 10 magnetómetros, preferiblemente al menos 20 magnetómetros, y/o en donde los magnetómetros estén dispuestos en una matriz o en una línea, en particular una línea recta, o en líneas (rectas) paralelas y/o en donde la distancia entre la mayoría de, preferiblemente todos, los magnetómetros sea igual.

En principio, todos los magnetómetros existentes y futuros son adecuados. Los ejemplos incluyen magnetómetros configurados para medir magnetismo basado en efecto Hall, en magnetorresistencia anisotrópica (AMR) o en válvula de flujo. Se prefiere que los magnetómetros midan magnetismo en al menos dos direcciones, preferiblemente en tres direcciones.

El sistema puede comprender un controlador conectado a los magnetómetros y configurado para encender los magnetómetros, es decir, activar los magnetómetros, iniciar las lecturas/mediciones y apagar los magnetómetros, preferiblemente periódicamente. El sistema puede comprender una batería y/o un dispositivo de generación y/o de recolección de energía.

El controlador puede comprender un procesador, una memoria, por ejemplo, una (E)EPROM en una placa de circuito impreso, que es accesible a través del controlador.

El sistema puede comprender un transmisor para enviar datos leídos con los magnetómetros a un receptor y en donde el transmisor se basa preferiblemente en el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), Largo Alcance Baja Potencia (LoRa), Wifi y otros estándares de Radiofrecuencia.

- 5 Los magnetómetros se pueden acomodar en un alojamiento y/o incrustar en un material circundante, cuyo alojamiento y/o incrustación es resistente al agua y/o al aceite o a prueba de intemperie, agua y/o aceite. El controlador y/o el transmisor se pueden acomodar en un alojamiento separado, y el controlador se conecta a los magnetómetros, por cable o de manera inalámbrica.

El sensor puede comprender una capa adhesiva, por ejemplo, en forma de cinta adhesiva o un recubrimiento, sujetadores mecánicos y/o uno o más imanes para montar el sensor en una estructura metálica.

- 10 Un programa informático puede comprender instrucciones para hacer que el sistema descrito anteriormente ejecute los pasos del método descrito anteriormente y un medio legible por ordenador que tiene el programa informático almacenado en el mismo.

- 15 El documento US 2015/377012 se refiere a una metodología y un sistema para el reconocimiento y seguimiento de anomalías en una variedad de componentes, tales como componentes tubulares. La técnica comprende detectar anomalías en el componente y almacenar las anomalías detectadas en un medio de almacenamiento. Las anomalías detectadas se comparan con descripciones digitales almacenadas de anomalías. Las descripciones digitales almacenadas pueden comprender anomalías de tipos similares y/o anomalías detectadas previamente en el componente específico que se prueba. Las anomalías detectadas se clasifican según las similitudes con respecto a las descripciones digitales almacenadas.

- 20 El documento US 2018/038833 se refiere a un método y un sistema para crear y usar estructuras ferromagnéticas premagnetizadas, donde la dirección del campo magnético gira con la profundidad, y analizar la naturaleza de los defectos en las estructuras.

- 25 El documento US 2014/368191 describe un dispositivo para el descubrimiento, la identificación y la monitorización de imperfecciones mecánicas en estructuras metálicas, basado en una técnica de tomografía magnetográfica/magnética para identificar defectos relacionados con la tensión.

- 30 El documento US 2017/176389 se refiere a un método para identificar y localizar un defecto en un raíl metálico, cuyo método incluye los pasos de colocar un primer sensor magnético a una distancia por encima de un raíl, el primer sensor magnético que está configurado para medir un campo magnético del raíl; avanzar el sensor a lo largo de la longitud del raíl; muestrear mediciones de campo magnético; determinar múltiples gradientes de campo magnético sobre diferentes pluralidades de muestras; identificar un defecto en el raíl en base a un cambio en uno o más de los gradientes de campo magnético; y determinar una posición del defecto a una distancia particular del sensor magnético en base a un grado de variación en los gradientes del campo magnético.

- 35 En el documento US 2015/330946, se detectan defectos en materiales ferromagnéticos y se caracterizan analizando los campos magnéticos de los artículos para encontrar partes de los campos magnéticos que difieren de forma característica de los campos magnéticos residuales generados por partes no defectuosas de los artículos. Las partes de los campos magnéticos que difieren de forma característica corresponden a las ubicaciones de los defectos. Los campos magnéticos residuales corresponden a partes de los artículos distantes de los defectos. La caracterización de los defectos puede incluir el volumen de material perdido debido a cada defecto y/o el ancho y/o la profundidad de cada defecto.

- 40 El documento US 2017/108469 se relaciona con un sistema y un método que usan detección magnética para caracterizar de manera no intrusiva y no destructiva el material ferromagnético dentro de la infraestructura. El sistema incluye sensores para medir gradientes de campo magnético desde una distancia de separación adyacente al material ferromagnético. El método incluye usar el sistema para medir campos magnéticos, determinar gradientes de campo magnético medidos por una matriz de sensores y comparar los gradientes de campo magnético medidos y modelados o históricos en la misma posición o posiciones similares para identificar diferencias causadas por un fenómeno en el material ferromagnético y, en una realización particular, para reconocer defectos y defectos en desarrollo.

La invención se explicará ahora con más detalle con referencia a las Figuras.

La Figura 1 muestra esquemáticamente un sistema para detectar y/o monitorizar el crecimiento de defectos.

- 50 La Figura 2 muestra un ejemplo específico de una tira de sensores para usar en el sistema de la Figura 1, que comprende una pluralidad de magnetómetros.

Las Figuras 3 y 4 muestran los resultados de lecturas (Figura 3) de valores de fuga de flujo magnético (MFL) con una pluralidad de magnetómetros y los resultados del procesamiento de las lecturas (Figura 4).

La Figura 1 muestra esquemáticamente un sistema 1 para detectar y monitorizar el crecimiento de defectos que comprende una pluralidad de tiras de sensores 2 que se colocan sobre o cerca de un defecto (sospechoso) y una unidad de control 3 para operar y comunicarse con las tiras de sensores. Cada tira comprende una pluralidad de magnetómetros de efecto Hall triaxiales 4, preferiblemente al menos 3, preferiblemente dispuestos en una línea, en particular una línea recta, y tiene una superficie adhesiva para unir la tira a una estructura de acero, tal como una estructura de ingeniería civil y marina.

En este ejemplo, la unidad de control 3 comprende un paquete de baterías 5, un imán permanente 6 para unir la unidad de control a la estructura de acero, una placa controladora y un procesador 7, tal como un plc, un microcontrolador o un ordenador de placa única, puertos de conexión 8 para cables 9 que conectan las tiras de sensores a la unidad de control, y un módulo de radiofrecuencia (RF) 10 para comunicarse con un ordenador central (no mostrado).

El controlador está configurado para encender los magnetómetros, es decir, activar los magnetómetros, leer valores de fuga de flujo magnético (MFL) de la pluralidad de magnetómetros en tres direcciones y apagar los magnetómetros. El transmisor está configurado para enviar datos leídos con los magnetómetros a un receptor conectado al ordenador central, por ejemplo, a través de GSM, LoRa, Wii u otro estándar de radiofrecuencia.

La Figura 2 muestra un sensor 2 para llevar a cabo mediciones de MFL, que tiene 30 magnetómetros de efecto Hall triaxiales 4 dispuestos en línea recta con una separación constante de centro a centro de 3,2 mm. En la Figura 2, la tira está adherida a una estructura de acero 11 a lo largo y esencialmente paralela a una grieta de rotura de superficie 12 existente que tiene un punto singular claramente visible, es decir, la punta 13 de la grieta 12.

El sensor de la Figura 2 se usó para llevar a cabo una primera lectura de valores de MFL en tres direcciones, en este ejemplo

en la dirección en la que se extendió la grieta y en el plano de la superficie de la estructura, a la que también se hace referencia en este contexto como la dirección Y,

en la dirección perpendicular a la dirección Y y perpendicular a la superficie de la estructura, a la que también se hace referencia en este contexto como la dirección Z, y

en la dirección perpendicular a la dirección en la que se extendió la grieta y en el plano de la superficie de la estructura, a la que también se hace referencia en este contexto como la dirección X.

Además, la intensidad de campo total (escalar) en cada magnetómetro se calculó en el ordenador central a partir de los valores medidos en las tres direcciones.

En este ejemplo, se llevaron a cabo una segunda y tercera lecturas un mes más tarde y dos meses más tarde, respectivamente. Los resultados de estas lecturas se muestran en la Figura 3, donde la primera lectura está marcada como "JUL", la segunda lectura como "AGO" y la tercera lectura como "SEP". En la Figura 3, las ubicaciones de la punta real de la grieta en los momentos de las lecturas están marcadas con líneas verticales.

Las lecturas individuales mostradas en la Figura 3 no contienen información o al menos contienen información insuficiente para situar con precisión la punta de la grieta.

La Figura 4 muestra los valores de fuga de flujo magnético (MFL) de la segunda y tercera lecturas procesadas con la lectura de la primera y segunda lecturas, respectivamente. En este ejemplo, los valores de la primera lectura se restaron de los valores de la segunda lectura y los valores de la segunda lectura se restaron de los valores de la tercera lectura.

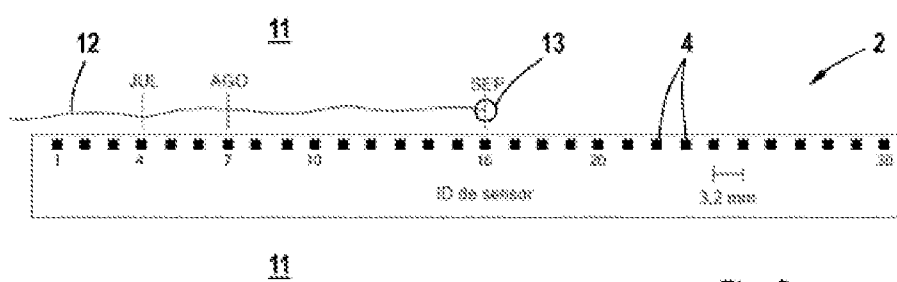
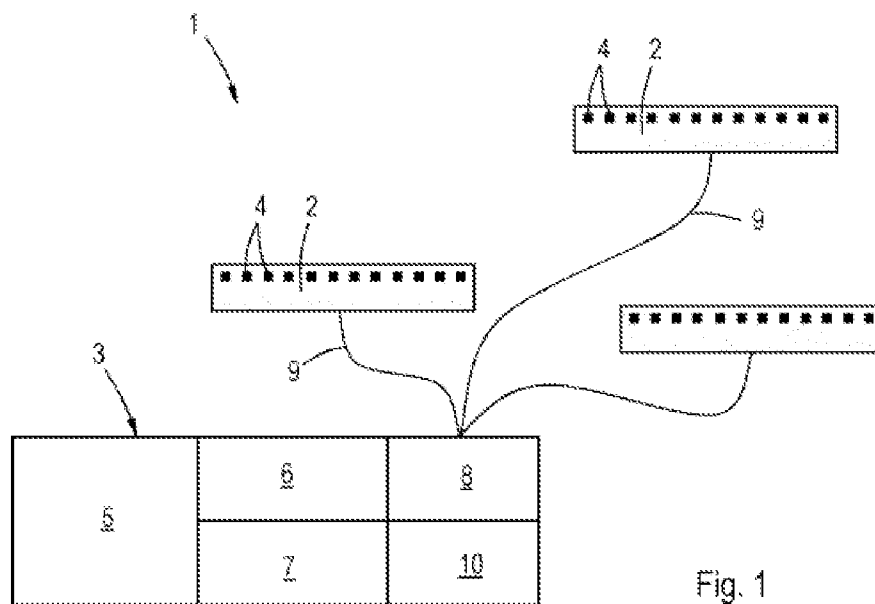
Las curvas resultantes de los valores procesados para MFL en la dirección Y, a lo largo de la grieta, cambian de un valor positivo a un valor negativo en los sensores nº 7 (AGO) y nº 15 (SEP) y las curvas resultantes de los valores procesados para MFL en la dirección X muestran cada una un pico único y distinto en los mismos sensores, nº 7 (AGO) y nº 15 (SEP). La posición de estos sensores correspondía con precisión a la ubicación real de la punta de la grieta en el momento de la segunda lectura (AGO) y la tercera lectura (SEP), respectivamente.

Los beneficios de la detección de defectos y de un sistema de monitorización de defectos basado en tales mediciones son, por ejemplo, que se puede evaluar el nivel de riesgo de los objetos medidos, que se puede tomar una decisión racional sobre la reparación de defectos y que se pueden realizar inspecciones menos frecuentes por los inspectores, lo que se traduce en menos lesiones/accidentes y/o costes significativamente reducidos.

La invención no está restringida a las realizaciones descritas anteriormente y se puede variar de numerosas formas dentro del alcance de las reivindicaciones. Por ejemplo, el sensor se puede emplear para detectar nuevas grietas, por ejemplo, colocando sensores en ubicaciones donde es relativamente probable que se formen grietas.

REIVINDICACIONES

1. Un método de detección y/o monitorización de la formación y/o el crecimiento de grietas (12) o deformación plástica y/o grietas (12) o deformación plástica sospechosas en estructuras ferromagnéticas (11), tales como estructuras de ingeniería civil y marinas, que comprende
- 5 leer de manera pasiva valores de fuga de flujo magnético (MFL) mediante la lectura de la magnetización inducida por tensión y/o el campo magnético de la Tierra a partir de una pluralidad de magnetómetros (4) dispuestos en línea y montados en una estructura (11) y sobre o cerca de una grieta (12) o deformación plástica y/o grieta (12) o deformación plástica sospechosa, en un primer momento en el tiempo, y
- almacenar los valores de fuga de flujo magnético (MFL),
- 10 leer de manera pasiva valores de fuga de flujo magnético (MFL) mediante la lectura de la magnetización inducida por tensión y/o el campo magnético de la Tierra a partir de una pluralidad de magnetómetros (4) en un momento adicional en el tiempo,
- procesar los valores de la lectura adicional con los valores de la lectura anterior, y
- determinar la ubicación de un punto singular (13) de la grieta (12) o deformación plástica y/o grieta (12) o deformación plástica sospechosa a partir de la lectura adicional procesada.
- 15 2. El método según la reivindicación 1, en donde se llevan a cabo lecturas adicionales a intervalos más cortos que una semana, preferiblemente un día o menos de 24 horas.
3. El método según la reivindicación 1 o 2, en donde los valores comprenden datos de MFL en dos o más direcciones y/o en donde los magnetómetros (4) están dispuestos en una línea recta.
- 20 4. El método según la reivindicación 2 o 3, que comprende el paso de comparar los conjuntos de valores de MFL en diferentes direcciones, seleccionar al menos un conjunto y determinar la ubicación de un punto singular (13) de la grieta (12) o deformación plástica y/o grieta (12) o deformación plástica (12) sospechosa a partir del conjunto seleccionado.
- 25 5. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el procesamiento de los valores de la lectura adicional con los valores de la lectura anterior implica al menos uno de los pasos de cálculo de un promedio móvil (ponderado), una derivada, una diferencia, un error cuadrático medio (ponderado), un error de mínimos cuadrados (ponderado), un cruce por cero o filtrado de ruido y de procesamiento de reducción de señal.
6. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los valores de la lectura anterior se restan de los valores de la lectura adicional.
- 30



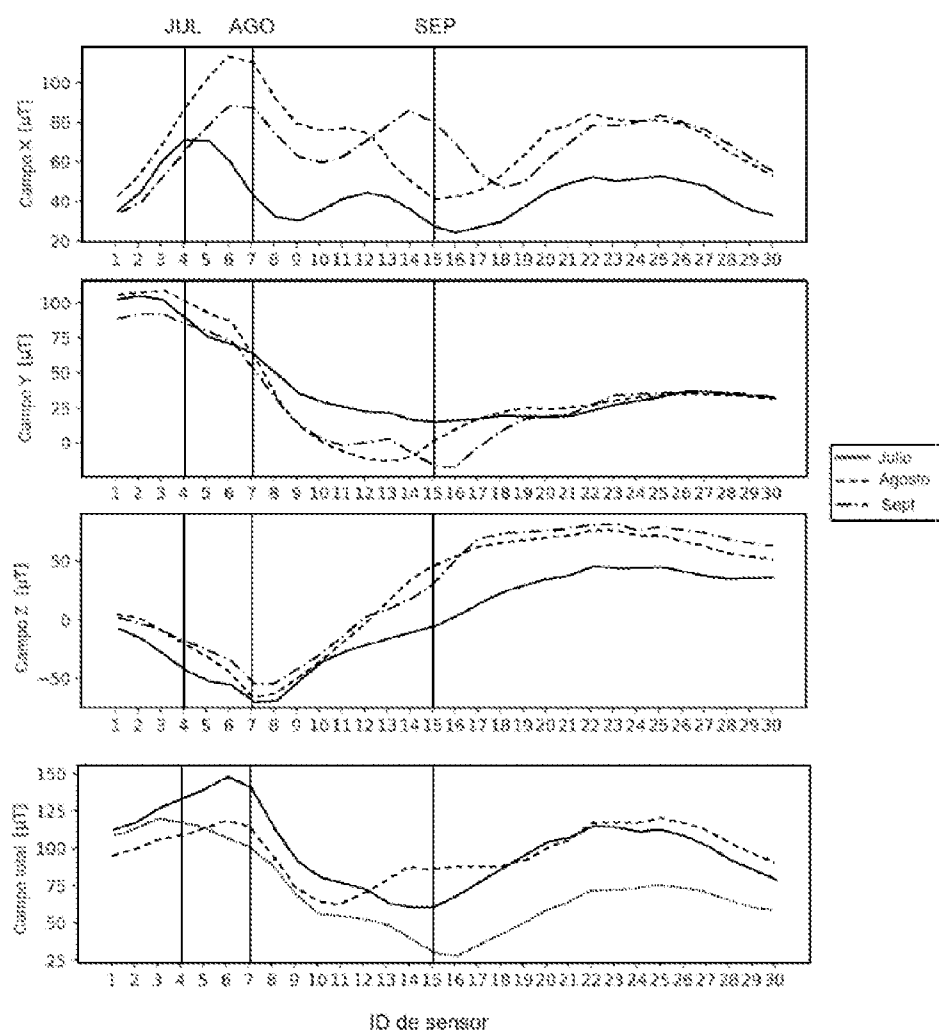


Fig. 3

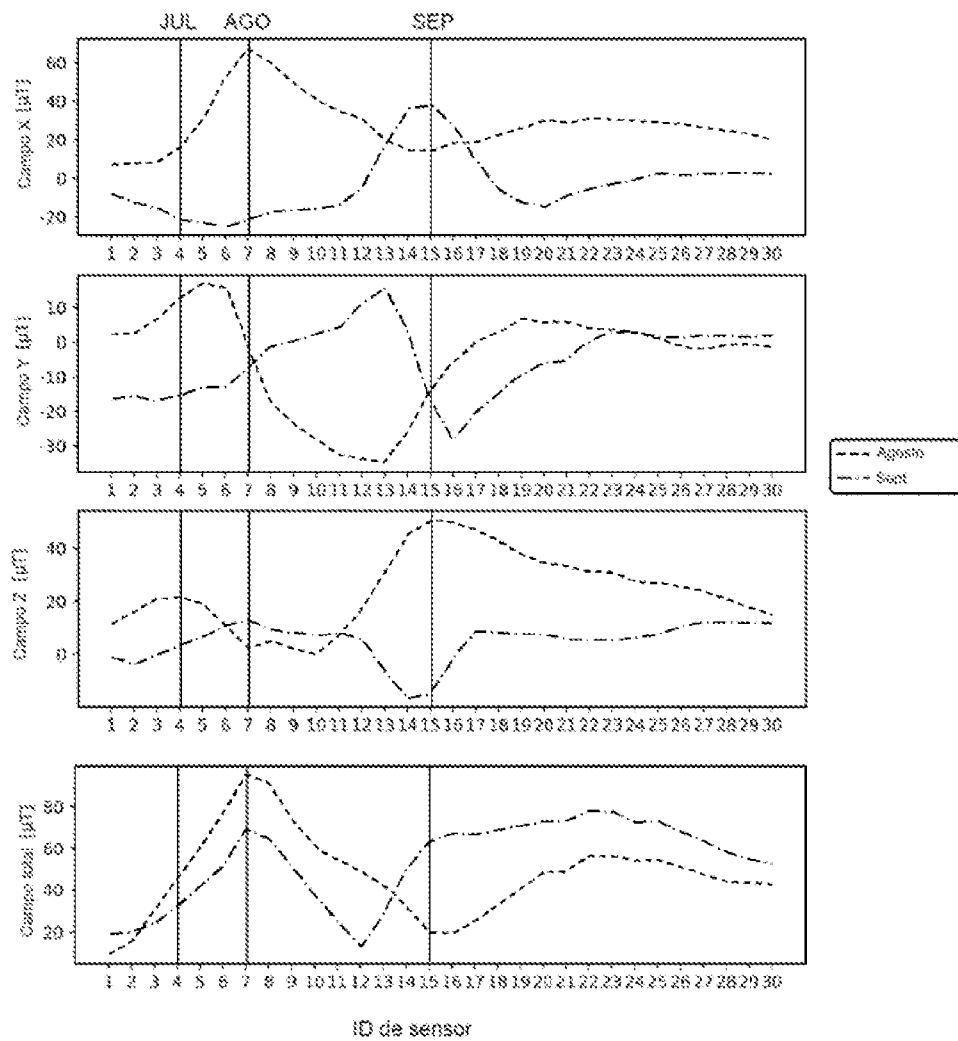


Fig. 4