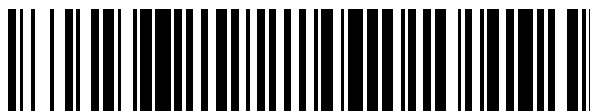


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 700 199**

51 Int. Cl.:

G01N 29/11 (2006.01)

G01N 29/06 (2006.01)

G01N 29/265 (2006.01)

G01N 29/44 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.11.2015** **E 15819846 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.09.2018** **EP 3224611**

54 Título: **Procedimiento de detección y de caracterización por ultrasonidos de defectos en un material heterogéneo**

30 Prioridad:

27.11.2014 FR 1461602

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

14.02.2019

73 Titular/es:

ELECTRICITÉ DE FRANCE (100.0%)

22-30 Avenue de Wagram

75008 Paris, FR

72 Inventor/es:

PAUL, NICOLAS y

FILIOT, PIERRE-LOUIS

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 700 199 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 detección y de caracterización por ultrasonidos de defectos en un material heterogéneo.

5 Campo técnico general y contexto de la invención

La presente invención se refiere al control no destructivo de materiales, y, de manera más precisa, a la detección y a la caracterización, por ultrasonidos, de defectos en un material heterogéneo.

10 Habitualmente, los ultrasonidos se utilizan para la implementación de controles no destructivos de materiales. Para ello se utiliza un transductor ultrasónico situado en la superficie del material a examinar, el cual emite ondas ultrasónicas en el interior del material. Estas ondas se propagan dentro del material y son reflejadas por el mismo en función de su estructura. El transductor recibe estas ondas reflejadas, y su análisis permite detectar eventuales defectos en el material.

15 Sin embargo, para un material heterogéneo, es decir, un material policristalino cuyo tamaño de grano es del orden de la longitud de onda ultrasónica en este material, el fenómeno de difusión de la onda ultrasónica por la estructura del material se convierte en preponderante. Esta difusión puede conducir, entonces, a la generación de un ruido estructural, es decir, una señal ultrasónica de amplitud no despreciable recibida por el transductor y que presenta características parecidas a las que emitiría una onda reflejada por un defecto, ocasionando, así, un deterioro de la capacidad de detección de los defectos que están presentes realmente en el material.

20 En efecto, en la medida en la que el ruido estructural presenta características temporales y espectrales similares a las de las firmas de defecto que constituyen la señal útil, los planteamientos clásicos de tratamiento de las señales ultrasónicas, por filtrado temporal o frecuencial, deconvolución o proyección sobre bases de ondículas resultan ineficaces.

25 La solicitud de patente US 2007/0006651 A 1 describe un procedimiento de control no destructivo por medio de ondas ultrasónicas, basado en la comparación de la amplitud del espectro frecuencial de una selección de la señal, con una amplitud de referencia. Esta solicitud menciona la posibilidad de efectuar las mediciones en diferentes posiciones, y menciona la combinación de estas mediciones para obtener una señal de medición media en el sentido espacial. No obstante, un procedimiento de este tipo no aporta una satisfacción completa, y la señal sigue quedando contaminada con ruido.

35 Presentación de la invención

La presente invención tiene como objetivo proponer un procedimiento de detección, por ultrasonidos, de defectos en un material heterogéneo, que permite reducir la influencia del ruido estructural que contamina los datos recopilados.

40 Con este fin, se propone un procedimiento de detección y de caracterización, por ultrasonidos, de defectos en un material heterogéneo, que comprende las siguientes etapas:

- emisión de ultrasonidos a partir de un transductor emisor ultrasónico situado contra el material,
- adquisición, por un transductor receptor ultrasónico en diferentes posiciones con respecto a dicho material, de una pluralidad de señales temporales representativas de la amplitud de los ultrasonidos propagados en el material en función del tiempo para una posición del transductor receptor ultrasónico,

50 comprendiendo el procedimiento las etapas de:

- determinación de una función temporal representativa de una potencia espacialmente media de las señales temporales en correspondencia con diferentes posiciones del transductor receptor ultrasónico, de manera que la función temporal representativa de la potencia espacialmente media de las señales temporales es de fórmula general:

$$f(t) = \left(\beta \sum_z |x(z, t) - m(t)|^\alpha \right)^{\gamma}$$

60 siendo α , β y γ diferentes de cero, $x(z, t)$ la señal temporal representativa de la amplitud del sonido propagado en el material en función del tiempo para una posición z del transductor receptor ultrasónico, y $m(t)$ una función del tiempo,

- normalización de las señales temporales por medio de dicha función temporal para obtener señales

temporales normalizadas,

- detección y caracterización de los defectos del material a partir de dichas señales temporales normalizadas.

La invención se completa ventajosamente con las siguientes características, consideradas individualmente o en una cualquiera de sus combinaciones técnicamente posibles:

- o bien $m(t)=0$, o bien $m(t)=\frac{1}{N_z} \sum_z x(z,t)$, o bien $m(t)=\text{mediana}_z\{x(z,t)\}$, y
- o bien $\alpha=2$ y $\gamma=0,5$, o bien $\alpha=1$ y $\gamma=1$, y
- $\beta=\frac{1}{N_z}$ o $\beta=\frac{1}{N_z-1}$ o $\beta=1$, con N_z el número de posiciones, siendo N_z superior a 2;
- se selecciona $m(t) = 0$, $\alpha=2$ y $\gamma=0,5$, $\beta=\frac{1}{N_z}$, siendo la función temporal una desviación estándar $\sigma(t)$ espacial de las señales temporales de diferentes posiciones del transductor receptor, quedando definidas dichas posiciones por su altitud h y su ángulo θ :

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N_h N_\theta} \sum_{N_h} \sum_{N_\theta} x^2(h, \theta, t)}$$

- la normalización de una señal temporal $x(z,t)$ por medio de dicha función temporal $f(t)$ corresponde a la división de dicha señal temporal por dicha función temporal:

$$x_{\text{norm}}(z,t) = \frac{x(z,t)}{f(t)}$$

- una señal temporal representativa de la amplitud del sonido que se propaga en el material en función del tiempo para una posición del transductor receptor es una representación espacio-temporal de tipo A representativa de la amplitud del sonido que se propaga en el material en función del tiempo para una posición del transductor receptor;
- la detección de los defectos comprende una etapa de determinación de por lo menos una representación espacial de tipo C seleccionando para cada posición del transductor receptor ultrasónico el valor máximo, en el tiempo, del valor absoluto de la señal temporal normalizada correspondiente a esta posición;
- la detección de los defectos comprende una etapa de filtrado espacial de dicha por lo menos una representación espacial de tipo C por medio de un filtro espacial paso-bajo;
- la detección de los defectos comprende una etapa de comparación con un umbral de detección, de la relación entre, por un lado, el valor absoluto de la diferencia entre el valor adoptado por la representación espacial de tipo C para una posición y la media de los valores de la representación espacial de tipo C y, por otro lado, la desviación estándar de los valores de la representación espacial de tipo C;
- de manera previa a la determinación de la función temporal:
 - se determina por lo menos una representación espacial de tipo C seleccionando, para cada posición del transductor receptor ultrasónico, el valor máximo, en el tiempo, del valor absoluto de la señal temporal correspondiente a esta posición,
 - se aplica a esta representación espacial de tipo C un filtro espacial paso-bajo bidimensional de pretratamiento con el fin de obtener un nivel medio del ruido estructural a nivel de cada posición de medición,
 - se divide cada señal temporal por el nivel medio del ruido estructural a nivel de la posición de medición a la cual está asociada dicha señal temporal.

La invención se refiere, también, a un producto de programa de ordenador que comprende instrucciones de código de programa para la ejecución del procedimiento según la invención cuando dicho programa se ejecuta

en un ordenador.

Presentación de las figuras

- 5 La invención se entenderá mejor, gracias a la descripción que se ofrece a continuación, la cual se refiere a un ejemplo de realización preferido, aportado a título de ejemplo no limitativo y explicado en referencia a los dibujos esquemáticos adjuntos, en los cuales:
- 10 - las figuras 1 y 1b ilustran la inspección de un tubo por una sonda, dedicado, respectivamente, a la detección de defectos longitudinales circunferenciales;
 - la figura 2 ilustra la evolución de la desviación estándar del ruido estructural en función del tiempo de llegada;
 - 15 - las figuras 3a, 3b y 3c son ejemplos de representaciones de tipo C que ilustran diferentes etapas de un pretratamiento de reducción de la variabilidad espacial del ruido estructural;
 - la figura 4 es un ejemplo de representación de tipo C que corresponde a la selección, para cada posición del transductor receptor ultrasónico, del valor máximo, en el tiempo, del valor absoluto de la señal temporal correspondiente a esta posición, antes de la normalización;
 - 20 - la figura 5 ilustra la representación de tipo C de la figura 4 después de una normalización por medio de la desviación estándar espacial de las señales temporales,
 - 25 - la figura 6 ilustra una representación de tipo C, de la relación entre, por un lado, el valor absoluto de la diferencia entre el valor de la representación de tipo C de la figura 5 y de la media de estos valores, y, por otro lado, la desviación estándar de los valores de la representación de tipo C de la figura 5.

Descripción detallada

30 Con fines ilustrativos, la descripción que sigue se efectuará en el ámbito del control no destructivo de tubos de penetración de un fondo de vasija de un reactor nuclear por medio de transductores ultrasónicos. Dicha adquisición de las mediciones de los transductores se lleva a cabo habitualmente, en especial para la puesta en práctica de la técnica denominada de medición de la difracción del tiempo de vuelo, más conocida con el

35 acrónimo TOFD del inglés "time of flight diffraction", de la cual puede implementarse para la presente invención el mismo protocolo de adquisición.

La inspección de tubos de penetración de un fondo de vasija de un reactor nuclear presenta varios condicionantes propios del sector nuclear. Por un lado, este medio es susceptible de producir un envejecimiento prematuro de los materiales, y, por otro lado, las consecuencias de un fallo estructural son tales que todos los fallos deberían ser detectados lo antes posible. Por otra parte, la accesibilidad de estos tubos de penetración se limita a su interior, lo cual conlleva la necesidad de inspeccionar en su totalidad el grosor del tubo desde su cara interna, ya que una inspección desde el exterior de los tubos es difícilmente viable.

45 Un tubo de penetración de fondo de vasija está constituido, típicamente, por inconel, es decir, una aleación a base principalmente de níquel, de cromo, de hierro, y que contiene también cobre, manganeso y molibdeno, así como, eventualmente, otros componentes en una cantidad generalmente menor. Se trata de un material heterogéneo cuya estructura presenta granos de un tamaño comparable a la longitud de onda de las ondas ultrasónicas utilizadas en los controles no destructivos. A título de ejemplo, la frecuencia de las ondas

50 ultrasónicas utilizadas generalmente en controles no destructivos puede ir de 0,1 a 50 MHz, siendo la banda de 2 a 10 MHz la más empleada. En esta banda, la longitud de onda está comprendida, por tanto, prácticamente, para metales tales como el acero o el aluminio, entre 3 mm y 0,5 mm. Cabe indicar que el procedimiento no se limita necesariamente a un material heterogéneo, pero encuentra en el mismo una aplicación ventajosa.

55 La inspección de dichos tubos se realiza generalmente por medio de dos tipos de sondas. Una de las sondas está adaptada para detectar los defectos longitudinales, lo cual proporciona una señal longitudinal denominada TOFD-L, mientras que otra de las sondas está adaptada para detectar los defectos circunferenciales, lo cual aporta una señal circunferencial denominada TOFD-C. Las dos sondas pueden recorrer, por ejemplo, la superficie interna del tubo de manera helicoidal.

60 Las figuras 1a y 1b ilustran el barrido de un tubo 10 por los dos tipos de sondas ultrasónicas. La figura 1a muestra, así, una sonda 1 del tipo TOFD-L (longitudinal) que inspecciona un tubo 10, dispuesta enfrente de la pared interna 11 de este tubo 10, cuya curvatura es seguida por la sonda 1. El tubo 10 presenta un defecto 13, representado en este caso en forma de una muesca. El transductor emisor 14 y el transductor receptor 15 de la sonda 1 están dispuestos de manera que están orientados uno con respecto al otro perpendicularmente al eje longitudinal del tubo 10. Se encuentran, por tanto, en un plano perpendicular a dicho eje longitudinal del tubo 10.

La figura 1b muestra una sonda 2 de tipo TOFD-C (circunferencial) que inspecciona el tubo 10, que presenta el defecto 13. La sonda TOFD-C 2 está dispuesta enfrente de la pared interna 11 de este tubo 10, del cual sigue la curvatura. El transductor emisor 24 y el transductor receptor 25 de la sonda TOFD-C 2 están dispuestos de manera que están alineados en el eje longitudinal del tubo 10. Se encuentra, por tanto, en un plano paralelo a dicho eje longitudinal del tubo 10.

Para los dos tipos de sonda, el procedimiento de medición es similar, igual que el procedimiento de detección que se describirá. Por tanto, se puede utilizar uno u otro tipo de sonda, o bien los dos. Se emiten ultrasonidos a partir del transductor emisor ultrasónico 14, 24 situado contra el material. La sonda recorre el tubo, y, para una pluralidad de posiciones identificadas por la altitud h y el ángulo θ , se efectúa un disparo de ondas ultrasónicas, y la señal reflejada es recibida por el transductor receptor ultrasónico 15, 25. Por ejemplo, para las mediciones, el paso en altitud puede ser de 0,5 mm, y el paso en rotación de 1,44°.

Los datos así adquiridos quedan definidos por una amplitud en función del tiempo vinculada a una altitud h y un ángulo θ . Se puede indicar con z la posición definida por una altitud h y un ángulo θ . Se indicará entonces:

- $x_L(h, \theta, t)$ o $x_L(z, t)$: las señales temporales recibidas por la sonda TOFD-L 1, y
- $x_C(h, \theta, t)$ o $x_C(z, t)$: las señales temporales recibidas por la sonda TOFD-C 2,

A partir de estos datos, pueden construirse representaciones de varios tipos:

- la representación A, o exploración A, que es una señal temporal para una posición de sonda, cuyos datos se indican $x_L \text{ o } x_C(h, \theta)(t)$ o $x_L \text{ o } x_C(z)(t)$;
- la representación B, o exploración B, que puede ser o bien:
 - una señal en dos dimensiones, ángulo/tiempo, para una altitud dada: $x_L \text{ o } x_C(h)(\theta, t)$, o bien
 - una señal en dos dimensiones, altitud/tiempo, para un ángulo dado: $x_L \text{ o } x_C(\theta)(h, t)$;
- la representación C, o exploración C, que es una señal en dos dimensiones correspondiente a las amplitudes máximas (en valor absoluto) medidas para cada posición de la sonda

$$y_{L \text{ o } C}(h, \theta) = \max_t |x_{L \text{ o } C}(h, \theta, t)|$$

o

$$y_{L \text{ o } C}(z) = \max_t |x_{L \text{ o } C}(z, t)|$$

Para una mayor comodidad, y en la medida en la que son equivalentes, en lo sucesivo se omiten los índices (L o C) referentes al aspecto longitudinal o circunferencial de la sonda que ha adquirido las señales estudiadas.

Preferentemente, antes de proseguir con el procedimiento, se pone en práctica un pretratamiento con el fin de disminuir la variabilidad espacial del ruido estructural y mejorar, así, la eficacia de los tratamientos posteriores. Con este fin, se determina, en primer lugar, por lo menos una representación espacial de tipo C seleccionando para cada posición del transductor receptor ultrasónico el valor máximo, en el tiempo, del valor absoluto de la señal temporal correspondiente a esta posición, tal como se ha indicado más arriba. La figura 3a ilustra una representación de tipo C, o exploración C, representando el eje vertical la altitud, expresada, en este caso, con un paso de sonda de 0,5 mm, y el eje horizontal los ángulos θ , expresados, en este caso, con pasos angulares de 1,44°. En esta figura 3a, así como en las figuras siguientes 3b y 3c, un tono oscuro indica un valor reducido, mientras que un tono claro indica un valor elevado. Se distinguen por lo menos cuatro zonas que se diferencian por su nivel medio: una primera zona 31 que corresponde a los ángulos entre 0 y aproximadamente 50 pasos angulares de la sonda presenta un valor medio reducido (tono oscuro), una segunda zona 32 que corresponde a los ángulos entre aproximadamente 50 pasos angulares y aproximadamente 150 pasos angulares presenta un valor medio elevado (tono claro), una tercera zona 33 que corresponde a los ángulos entre aproximadamente 150 pasos angulares y aproximadamente 200 pasos angulares presenta un valor medio reducido (tono oscuro), una cuarta zona 34 que corresponde a los ángulos entre aproximadamente 200 pasos angulares y aproximadamente 250 pasos angulares presenta un valor medio elevado (tono claro).

A esta representación espacial de tipo C se le aplica un filtro espacial paso-bajo bidimensional de pretratamiento, con el fin de obtener un nivel medio del ruido estructural a nivel de cada posición de medición. Las dos frecuencias de corte, una para la altitud h y otra para el ángulo θ , se seleccionan de manera que corresponden a la inversa de la distancia según la cual el nivel de ruido estructural se supone relativamente constante. Retomando el ejemplo de más arriba, se tiene como frecuencia de corte y 1/50 pasos de sondas o 1/72 grados⁻¹.

La figura 3b ilustra la imagen de los valores medios de ruido estructural correspondientes a la exploración C de la figura 3a después de su filtrado por un filtro espacial paso-bajo bidimensional de pretratamiento. En ellas se encuentran las cuatro zonas que se diferencian por su nivel medio: una primera zona 41 que corresponde a los ángulos entre 0 y aproximadamente 50 pasos angulares presenta un valor medio reducido (tono oscuro), una segunda zona 42 que corresponde a los ángulos entre aproximadamente 50 pasos angulares y aproximadamente 150 pasos angulares presenta un valor medio elevado (tono claro), una tercera zona 43 que corresponde a los ángulos entre aproximadamente 150 pasos angulares y aproximadamente 200 pasos angulares presenta un valor medio reducido (tono oscuro), una cuarta zona 44 que corresponde a los ángulos entre aproximadamente 200 pasos angulares y aproximadamente 250 pasos angulares presenta un valor medio elevado (tono claro).

Se obtiene, por tanto, el nivel medio del ruido estructural a nivel de cada posición de medición. A continuación, cada señal temporal, es decir cada exploración A, se divide por el nivel medio del ruido estructural a nivel de la posición de medición a la cual está asociada dicha señal temporal. Indicando con $P(z)$ el nivel medio del ruido estructural a nivel de posición de medición z , y retomando la notación de las exploraciones A indicada más arriba, se tiene, por tanto, para las exploraciones A con el pretratamiento mencionado:

$$x_{(z)}(t)_{\text{pretratada}} = \frac{x_z(t)}{P(z)}$$

Después de este eventual pretratamiento de la variabilidad espacial del ruido estructural en las exploraciones A, nos centramos, a continuación, en la variabilidad temporal del ruido estructural en las exploraciones A. Las representaciones de tipo A corresponden a una pluralidad de señales temporales representativas de la amplitud del sonido que se propaga en el material en función del tiempo para una posición del transductor receptor ultrasónico 15, 25. Es a partir de estas señales temporales que se pondrá en práctica la detección de los defectos.

En las figuras 1a y 1b, se han representado diferentes trayectos de ondas ultrasónicas. Las ondas ultrasónicas son emitidas por el transductor emisor 14, 24 y penetran en el tubo 10 a nivel de su pared interna 11, y a continuación se propagan en el material de dicho tubo 10. Un primer trayecto 16, 26 constituye un camino corto para las ondas ultrasónicas, que son difractadas por el defecto 13 en dirección al transductor receptor 15, 25. Un segundo trayecto 17, 27 constituye un camino largo para las ondas ultrasónicas, que son reflejadas por la pared externa 12 del tubo 10 en dirección al transductor receptor 15, 25.

Son, por tanto, posibles, diferentes trayectos para las ondas ultrasónicas recibidas por el transductor receptor 15, 25, a partir de las cuales se construyen las diferentes señales de medición (exploración A, exploración B o exploración C). O, cuanto más largo es el trayecto de la onda ultrasónica en el material, más importante serán las interacciones con los granos del material. Esto se traduce en una potencia del ruido estructural que aumenta con el tiempo de trayecto de las ondas, y por tanto con el tiempo de recepción de las mismas.

Para caracterizar este fenómeno, se determina una función temporal representativa de la potencia espacialmente media de las señales temporales en correspondencia con diferentes posiciones del transductor receptor contra el material en función del tiempo de propagación de dichas señales. Por potencia espacialmente media se entiende la media, en el espacio, es decir según z o (h, θ) , de una magnitud, en este caso la potencia instantánea, en un tiempo t dado. La función temporal es representativa de esta potencia espacialmente media, lo cual quiere decir que la misma puede estar vinculada, de manera directa o indirecta, con la potencia espacialmente media, y, en consecuencia, se puede basar en una magnitud que no corresponda a esta potencia espacialmente media, sino vinculada a ella, tal como la desviación estándar espacial. En cualquier caso, esta función temporal hace intervenir, para cada instante t , una suma en el espacio que tiene en cuenta los valores adoptados por las señales temporales sobre dicho espacio en este instante t .

Cabe indicar que es realmente la potencia la que es espacialmente media, y no la señal de medición. Así, la función temporal en cuestión es una señal dependiente del tiempo, que, en un instante t , adopta un valor representativo de la media de las potencias en este instante t , de las señales temporales correspondientes a diferentes posiciones del transductor receptor ultrasónico.

Esta función temporal es de fórmula general:

$$f(t) = \left(\beta \sum_z |x(z, t) - m(t)|^\alpha \right)^\gamma$$

con α , β y γ diferentes de cero, $x(z, t)$ la señal temporal representativa de la amplitud del sonido propagado en el material en función del tiempo para una posición z (definida por la altitud y el ángulo) del transductor receptor ultrasónico, siendo t el tiempo de trayecto o de propagación de la onda ultrasónica, y $m(t)$ una función del tiempo.

Se puede seleccionar:

- 5 • o bien $m(t) = 0$, o bien $m(t) = \frac{1}{N_z} \sum_z x(z, t)$, es decir la media de la señal x en el espacio, o bien $m(t) = \text{mediana}_z\{x(z, t)\}$, y
- preferentemente o bien $\alpha=2$ y $\gamma=0,5$, lo cual corresponde a la desviación estándar, o bien $\alpha=1$ y $\gamma=1$, lo cual corresponde a la desviación absoluta media, y
- 10 • preferentemente $\beta = \frac{1}{N_z}$ o $\beta = \frac{1}{N_z-1}$ o $\beta = 1$,

siendo N_z el número de posiciones que se tienen en cuenta, superior a dos.

- 15 Así, escogiendo $m(t) = 0$, $\alpha=2$, $\gamma=0,5$, $= \frac{1}{N_z}$, la función temporal es una desviación estándar $\sigma(t)$ espacial de las señales temporales, de diferentes posiciones del transductor receptor, quedando definidas dichas posiciones por su altitud h y su ángulo θ :

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N_h N_\theta} \sum_{N_h} \sum_{N_\theta} x^2(h, \theta, t)}$$

- 20 Preferentemente, las diferentes posiciones del transductor receptor a partir de las cuales se determina la función temporal corresponden a una porción del material estudiado, y no a su totalidad. Por tanto, se determina una función temporal para cada una de estas porciones de material. Las porciones de materiales así tratadas pueden estar yuxtapuestas, como en el caso de un tratamiento por bloque, aunque, preferentemente, las porciones de materiales se solapan y están, cada una de ellas, centradas sobre una posición de medición, de manera que hay
- 25 una función temporal para cada posición de medición que se determina a partir de la zona que rodea dicha posición en el material.

- La extensión de la porción de material que se tiene en cuenta depende de la variabilidad espacial del ruido estructural, y, por tanto, de la variabilidad espacial de la potencia de las señales medidas. A título de ejemplo, la
- 30 zona que rodea dicha posición se puede extender a partir de 100 puntos de medición, o posiciones, en altura, y a partir de 100 puntos de medición en ángulo. Con un paso de medición en altura de 0,5 mm, y un paso angular de 1,44 grados, se obtiene, así, una porción de material que se extiende a partir de 50 mm en altura y de 150 grados en anchura.

- 35 Las figuras 2a y 2b ilustran la desviación estándar espacial de las señales temporales en función del tiempo de llegada para la sonda L (figura 2a) y la sonda C (figura 2b) para una posición en la superficie de un tubo 10. Dado que el tubo 10 no consta más que de unos pocos defectos, la evolución temporal de la desviación estándar es debida esencialmente al ruido estructural. Se constata que la desviación estándar aumenta con el tiempo de llegada de la señal, por lo menos en una primera instancia, y, por tanto, con el tiempo entre la emisión de los ultrasonidos y su recepción por la sonda influye en la potencia del ruido estructural.
- 40

- En efecto, tal como se ha explicado más arriba, para un tiempo corto de trayecto de una onda ultrasónica, son posibles unos pocos caminos de difusión. En cambio, a un tiempo de trayecto elevado le corresponden numerosos caminos de difusión diferentes posibles para la onda ultrasónica. Al ser la señal total recibida la suma
- 45 de las ondas ultrasónicas difundidas, la potencia recibida será para los tiempos de trayecto elevados, y ello a pesar de la atenuación más importante de cada difusión. La atenuación de las señales se observa, sin embargo, en los tiempos de trayecto más largos, y, por tanto, en su dispersión representada por la desviación estándar, tal como muestra la ligera disminución final de las curvas de las figuras 2a y 2b.

- 50 A continuación, la función temporal representativa de la potencia espacialmente media de las señales temporales se utiliza para normalizar las señales temporales. De manera más precisa, la amplitud de una señal temporal $x(z, t)$ se divide por dicha función temporal $f(t)$:

$$x_{\text{norm}}(z, t) = \frac{x(z, t)}{f(t)}$$

- 55 Así, cuando la función temporal utilizada es la desviación estándar $\sigma(t)$, las señales de exploraciones A, que son señales temporales para una posición de sonda, cuyos datos se indican como $x_{(h, \theta)}(t)$, se pueden normalizar omitiendo el índice L o C que indica el tipo de defecto buscado por la sonda.

$$x_{(h,\theta)}^{norm}(t) = \frac{x_{(h,\theta)}(t)}{\sigma(t)}$$

5 La normalización permite aumentar el contraste entre la señal útil debida a un eventual defecto del material y el ruido estructural. Se pueden construir, entonces, exploraciones B normalizadas a partir de estas exploraciones A normalizadas. Asimismo, se pueden construir exploraciones C normalizadas a partir de estas exploraciones A normalizadas, seleccionando, para cada posición de transductor receptor ultrasónico, el valor máximo, en el tiempo, de la señal temporal normalizada correspondiente a esta posición:

$$10 \quad y^{norm}(h, \theta) = \max_t \left| \frac{x_{(h,\theta)}(t)}{\sigma(t)} \right|,$$

o

$$15 \quad y^{norm}(z) = \max_t \left| \frac{x_{(z)}(t)}{\sigma(t)} \right|$$

Se obtiene, por tanto, una señal derivada de la normalización de señales temporales por la función temporal representativa de la potencia espacialmente media de las señales temporales, en este caso por la desviación estándar dentro de este ejemplo.

20 Las figuras 4 y 5 ilustran la puesta en práctica de la normalización en un ejemplo de representación de tipo C, es decir una exploración C, que corresponde a la selección, para cada posición del transductor receptor ultrasónico, del valor máximo, en el tiempo, del valor absoluto de la señal temporal correspondiente a esta posición. Tal como anteriormente, el eje vertical representa la altitud, expresada en este caso en pasos de sonda de 0,5 mm, y el eje horizontal los ángulos, expresados en este caso en pasos angulares de 1,44°. En esta figura 4, así como en la

25 figura 5, un tono oscuro indica un valor reducido, mientras que un tono claro indica un valor elevado.

La figura 4 es, por tanto, un ejemplo de exploración C, antes de esta normalización. Se constata una distribución de los valores, visible por sus tonos, que parece aleatoria. En cambio, en la figura 5, que ilustra la representación de tipo C de la figura 4 después de la normalización por medio de la desviación estándar espacial de las señales temporales de una forma similar a la de las figuras 2a y 2b, se constata la revelación de dos conjuntos 51 y 52, en el centro de la exploración C, que se distinguen por valores más elevados que la zona circundante. Así, se ha

30 puesto de relieve la presencia de dos defectos correspondientes a estos dos conjuntos.

Quedan todavía por detectar y caracterizar los defectos por la detección de su firma en la señal obtenida. A este respecto, la detección y la caracterización de los defectos se efectúa, preferentemente, por medio de una señal espacial en dos dimensiones tal como la exploración C, en lugar de una señal temporal o espacio-temporal como una exploración B. En efecto, sea cual sea el perfil del defecto, por ejemplo ya se trate de una muesca rectangular o semielíptica, la proyección del defecto en la exploración C es un segmento recto, vertical para una muesca longitudinal u horizontal para una muesca circunferencial, o bien incluso una combinación de las dos, por

40 ejemplo como en el caso de una fisura que se extiende en diagonal, a la vez circunferencial y longitudinalmente en el tubo. La utilización de una representación espacial de tipo C, en dos dimensiones espaciales, permite, por tanto, prescindir del perfil de los defectos a detectar.

Los defectos tales como las muescas se pueden extender sobre varias decenas de milímetros. Los puntos de la exploración C a nivel de esta firma están, por tanto, inter-correlacionados entre sí, es decir, presentan una coherencia en varias posiciones espacialmente adyacentes a nivel del defecto. En cambio, en ausencia de firma de un defecto en la exploración C, con únicamente ruido, la exploración C presenta una inter-correlación mucho más débil en torno a un punto cualquiera. Así, cada muesca se puede identificar por una persistencia espacial en la exploración C según el ángulo y/o la altitud en la que aparece la misma.

45

Además, la configuración de las ondas TOFD, de tipo C o de tipo L, conlleva también persistencias espaciales. En efecto, el defecto tiene impacto en la señal ultrasónica recibida en tanto que el primero está situado entre el transductor emisor 14, 24 y el transductor receptor 15, 25 (véanse las figuras 1a y 1b). Consecuentemente, la persistencia del defecto se puede observar en varias posiciones (altitudes, ángulos) en las proximidades de un defecto en la exploración C.

50

55

Esta coherencia espacial se aprovecha, por tanto, para destacar la señal útil representativa de los defectos en detrimento del ruido, menos correlacionado espacialmente. Por tanto, sobre la señal derivada de la normalización, se pone en práctica un filtrado espacial que aprovecha esta correlación espacial, aplicando un

60 filtro espacial paso-bajo a la exploración C con el fin de filtrarla espacialmente. El filtro espacial paso-bajo está

diseñado para permitir la atenuación de la variabilidad del ruido estructural, caracterizada por la desviación estándar espacial de la distribución de sus amplitudes, aunque conservando el nivel de la firma de un defecto.

5 El filtro se denomina espacial puesto que no implica consideraciones temporales, siendo la exploración C una señal puramente espacial, sin variable temporal. El filtro espacial puede ser un filtro de una dimensión aplicado sobre la componente angular θ , es decir, que, para cada altitud h , se filtra la señal normalizada $y_{(h)}^{\text{norm}}(\theta)$, y/o sobre la componente de altitud h , es decir, que, para cada altitud h , se filtra la señal normalizada $y_{(\theta)}^{\text{norm}}(h)$.

10 La frecuencia espacial de corte del filtro espacial paso-bajo se puede seleccionar en función del tamaño mínimo ΔL_{min} de los defectos que se pretende detectar, como la inversa de este tamaño mínimo ΔL_{min} . Así, para detectar defectos de por lo menos 10 mm, la frecuencia espacial de corte se selecciona, por tanto, como inferior a 100 m^{-1} . Típicamente, el filtro espacial es un filtro de Butterworth.

15 El filtro espacial también puede ser un filtro espacial paso-bajo en dos dimensiones aplicado sobre la imagen de la exploración C. La respuesta en frecuencia en dos dimensiones se puede seleccionar en función del tamaño mínimo de los defectos buscados, igual que para un filtro espacial unidimensional.

20 La exploración C así filtrada permite obtener un mapa de detección de los defectos. En efecto, la firma aparece en la exploración C, especialmente por una amplitud diferente de los alrededores, lo cual permite detectarlos, aunque también localizarlos. En efecto, una exploración C es una representación espacial, y cada punto se localiza por su altitud y su ángulo.

25 Un método simple de detección consiste en utilizar un umbral dado: cualquier cruce del umbral por un conjunto de puntos adyacentes de la exploración C indica la presencia de un defecto.

30 Un método de detección un poco más elaborado se basa, no en los valores directamente adoptados por la exploración C, $y^{\text{filtrada}}(z)$, sino en una comparación con un umbral de detección de la relación entre, por un lado, el valor absoluto de la diferencia entre el valor adoptado por la representación espacial de tipo C para una posición y la media de los valores de la representación espacial de tipo C y, por otro lado, la desviación estándar de los valores de la representación espacial de tipo C. Retomando las notaciones anteriores, se tiene por tanto:

$$\frac{|y^{\text{filtrada}}(z) - \text{media}|}{\gamma} > \text{umbral}$$

35 siendo $y^{\text{filtrada}}(z)$ el valor de la exploración C, eventualmente filtrada, tomado en la posición z , media la media espacial de la exploración C, y γ la desviación estándar de los valores de la exploración C. El umbral de detección puede ser, por ejemplo, de 3.

40 Este método permite destacar de manera todavía más clara los defectos. Con fines ilustrativos, la figura 6 ilustra la puesta en práctica de este cálculo, sin que se haya implementado la etapa de filtrado espacial antes mencionada, por motivos de simplicidad en la demostración. La figura 6 muestra, así, una exploración C correspondiente a la relación entre, por un lado, el valor absoluto de la diferencia entre el valor de la representación de tipo C de la figura 5 y de la media de estos valores, y, por otro lado, la desviación estándar de los valores de la representación de tipo C de la figura 5. En ella se vuelven a encontrar los dos conjuntos 51 y 52 de valores elevados, aunque resaltados con respecto a las zonas que los rodean, con valores de 3 a 4 veces superiores a las mismas. La localización de los defectos resulta, por tanto, sencilla.

45 Una vez que se ha localizado el defecto en altitud y en ángulo, la posición del pico de amplitud en la exploración A normalizada correspondiente a la posición del defecto localizado permite determinar la profundidad del defecto.

50 El procedimiento descrito se pone en práctica, típicamente, con un ordenador provisto de un procesador y una memoria. A este efecto, se propone un producto de programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código de programa para la ejecución del procedimiento según la invención cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

55 La invención no se limita al modo de realización descrito y representado en las figuras adjuntas. Sigue siendo posible aplicar modificaciones, especialmente desde el punto de vista de la constitución de los diversos elementos o por sustitución de equivalentes técnicas, sin apartarse por ello del campo de protección de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de detección y de caracterización por ultrasonidos de defectos en un material heterogéneo (10), que comprende las siguientes etapas:

- emisión de ultrasonidos a partir de un transductor emisor ultrasónico (14, 24) colocado contra el material (10),
- adquisición, por un transductor receptor ultrasónico (15, 25) en diferentes posiciones con respecto a dicho material (10), de una pluralidad de señales temporales representativas de la amplitud de los ultrasonidos propagados en el material en función del tiempo para una posición del transductor receptor ultrasónico,

caracterizado por que el procedimiento comprende las etapas de:

- determinación de una función temporal representativa de una potencia espacialmente media de las señales temporales que corresponden a diferentes posiciones del transductor receptor ultrasónico (15, 25), siendo la función temporal representativa de la potencia espacialmente media de las señales temporales de fórmula general:

$$f(t) = \left(\beta \sum_z |x(z,t) - m(t)|^\alpha \right)^\gamma$$

con α , β y γ diferentes de cero, $x(z,t)$ la señal temporal representativa de la amplitud del sonido propagado en el material en función del tiempo para una posición z del transductor receptor ultrasónico, y $m(t)$ una función del tiempo,

- normalización de las señales temporales por medio de dicha función temporal para obtener unas señales temporales normalizadas,
- detección y caracterización de los defectos del material a partir de dichas señales temporales normalizadas.

2. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que:

- o bien $m(t)=0$, o bien $m(t)=\frac{1}{N_z} \sum_z x(z,t)$, o bien $m(t)=\text{mediana}_z\{x(z,t)\}$, y
- o bien $\alpha=2$ y $\gamma=0,5$, o bien $\alpha=1$ y $\gamma=1$, y
- $\beta=\frac{1}{N_z}$ o $\beta=\frac{1}{N_z-1}$ o $\beta=1$, con N_z el número de posiciones, siendo N_z superior a 2.

3. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que $m(t)=0$, $\alpha=2$ y $\gamma=0,5$, $\beta=\frac{1}{N_z}$, siendo la función temporal una desviación estándar $\sigma(t)$ espacial de las señales temporales de diferentes posiciones del transductor receptor, estando dichas posiciones definidas por su altitud h y su ángulo θ :

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N_h N_\theta} \sum_{N_h} \sum_{N_\theta} x^2(h, \theta, t)}$$

4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la normalización de una señal temporal $x(z,t)$ por medio de dicha función temporal $f(t)$ corresponde a la división de dicha señal temporal por dicha función temporal:

$$x_{\text{norm}}(z,t) = \frac{x(z,t)}{f(t)}$$

5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que una señal temporal representativa de la amplitud del sonido propagado en el material en función del tiempo para una posición del transductor receptor es una representación espacio-temporal de tipo A representativa de la amplitud del sonido propagado en el material en función del tiempo para una posición del transductor receptor.

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la detección de los defectos comprende una etapa de determinación de por lo menos una representación espacial de tipo C seleccionando

para cada posición de transductor receptor ultrasónico el valor máximo en el tiempo del valor absoluto de la señal temporal normalizada correspondiente a esta posición.

5 7. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que la detección de los defectos comprende una etapa de filtrado espacial de dicha representación espacial de tipo C por medio de un filtro espacial paso-bajo.

10 8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 6 o 7, en el que la detección de los defectos comprende una etapa de comparación con un umbral de detección, de la relación entre, por un lado, el valor absoluto de la diferencia entre el valor adoptado por la representación espacial de tipo C para una posición y la media de los valores de la representación espacial de tipo C y, por otro lado, la desviación estándar de los valores de la representación espacial de tipo C.

15 9. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, previamente a la determinación de la función temporal:

- se determina por lo menos una representación espacial de tipo C seleccionando para cada posición de transductor receptor ultrasónico, el valor máximo en el tiempo del valor absoluto de la señal temporal correspondiente a esta posición,

20 - se aplica a esta representación espacial de tipo C un filtro espacial paso-bajo bidimensional de pretratamiento con el fin de obtener un nivel medio del ruido estructural a nivel de cada posición de medición,

25 - se divide cada señal temporal por el nivel medio del ruido estructural a nivel de la posición de medición a la cual está asociada dicha señal temporal.

30 10. Producto de programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código de programa para la ejecución del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

FIG 1a

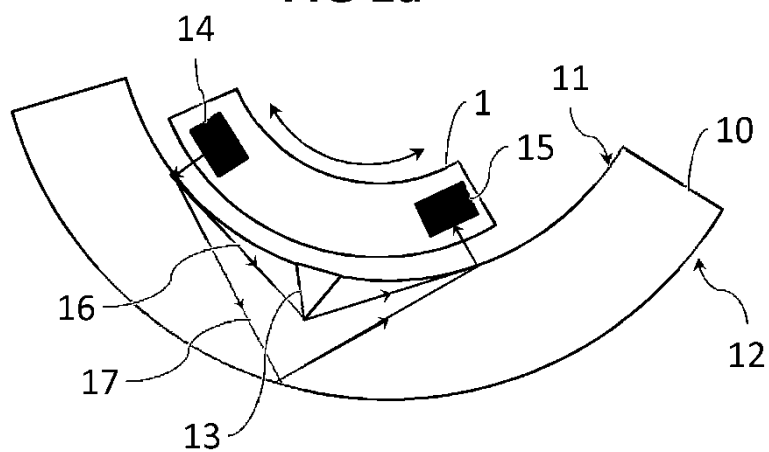


FIG 1b

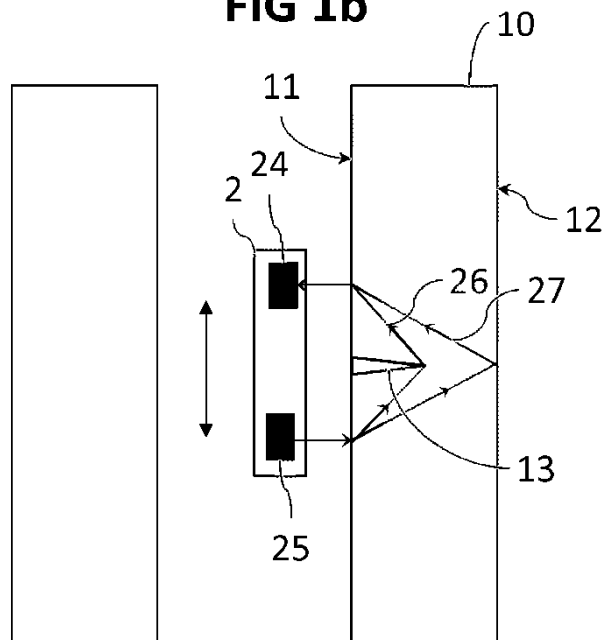


FIG 2a

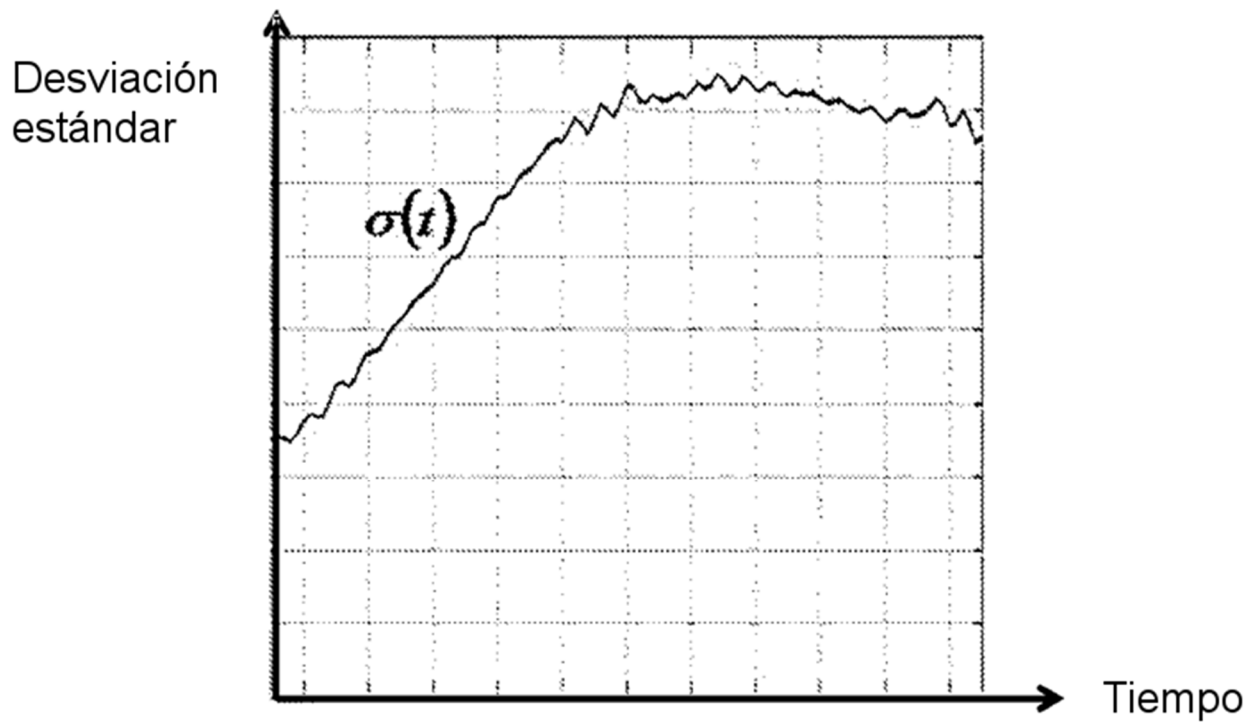
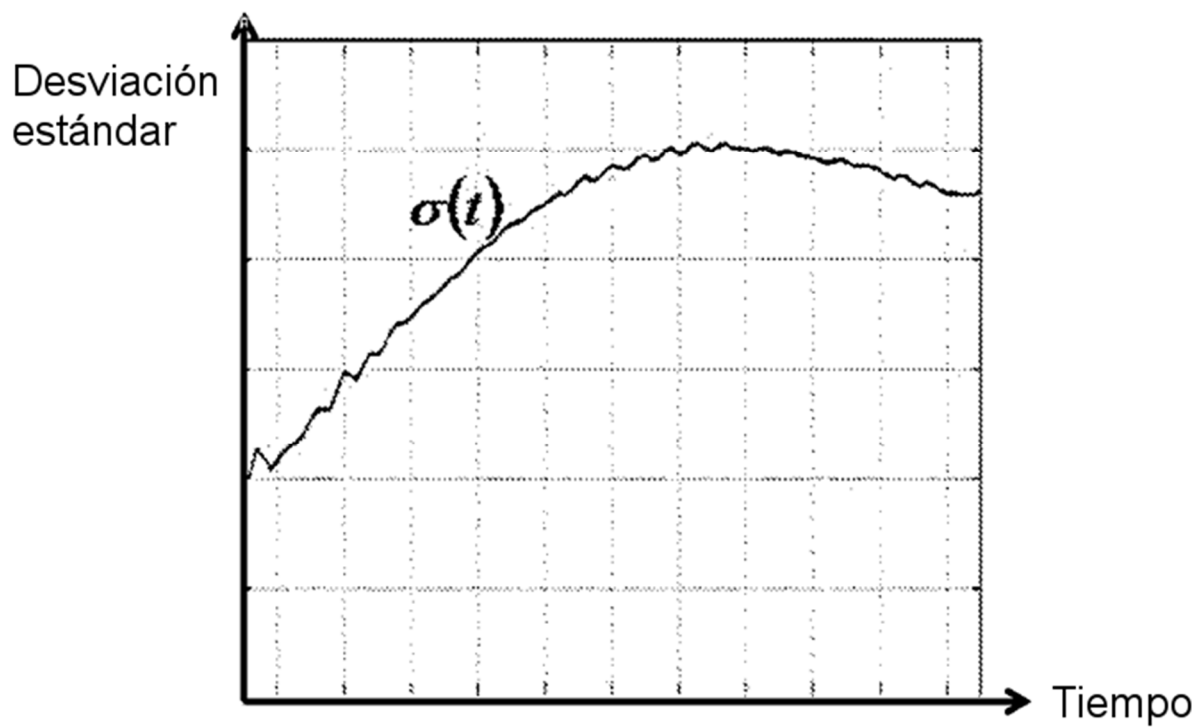


FIG 2b



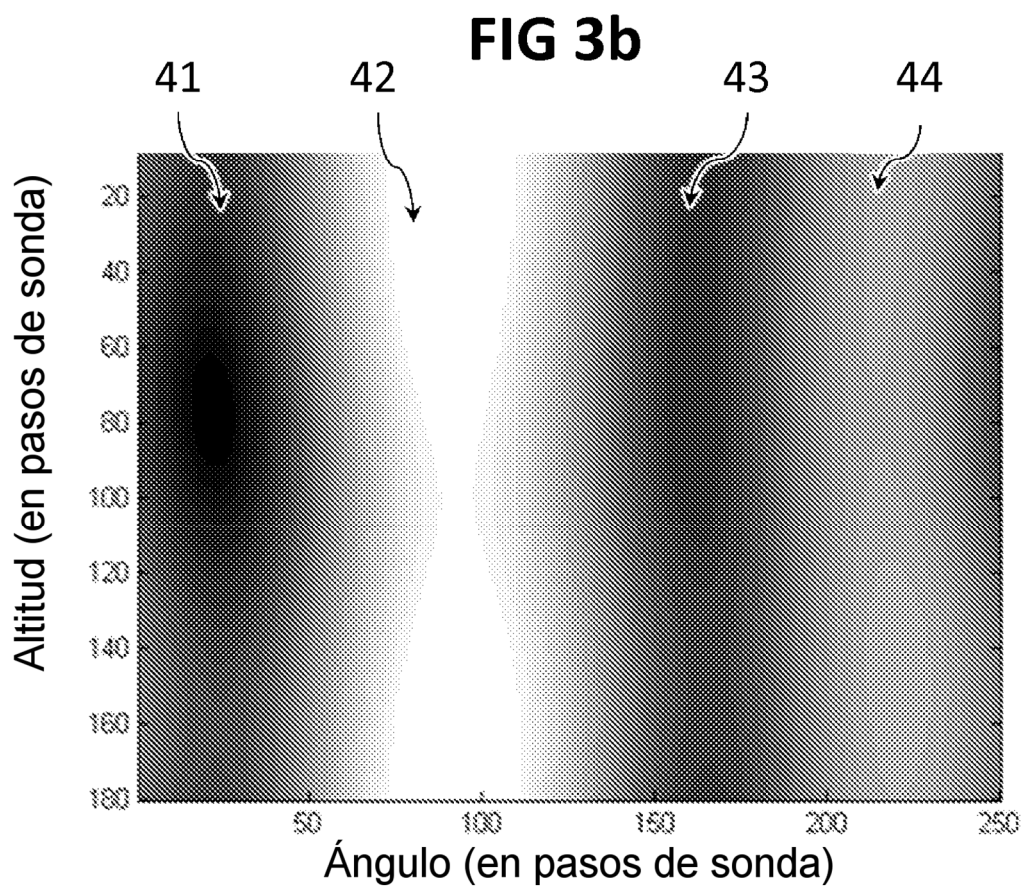
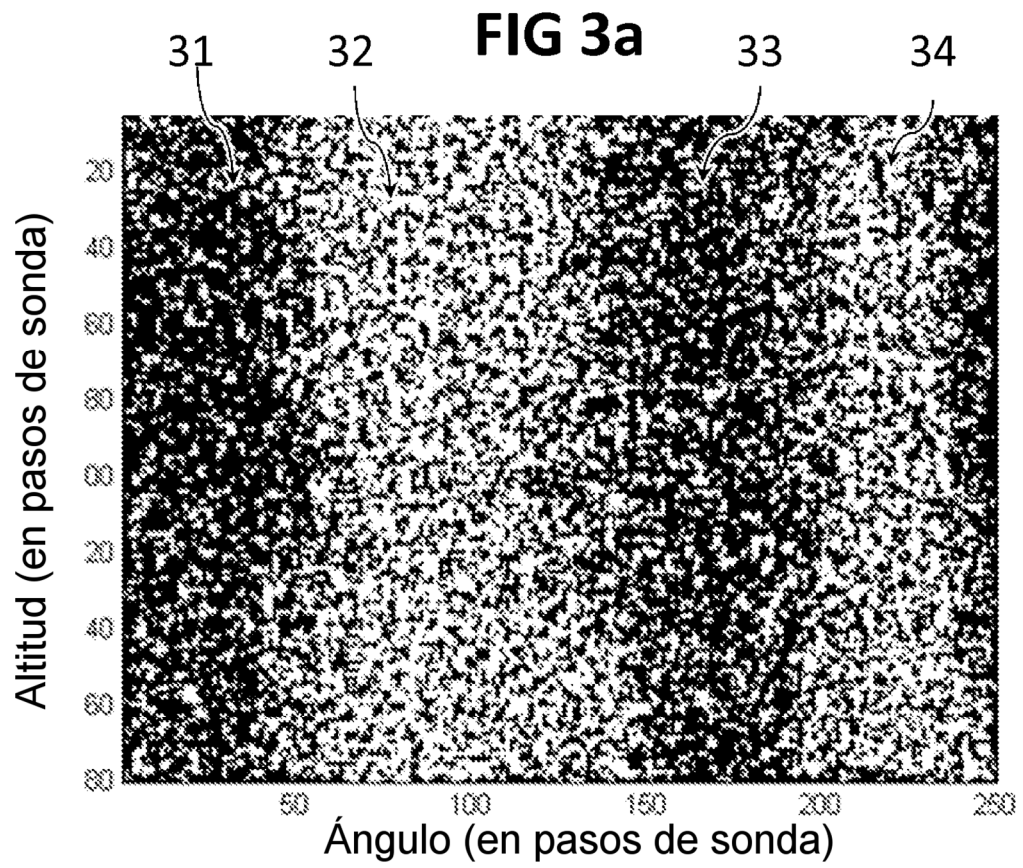


FIG 3c

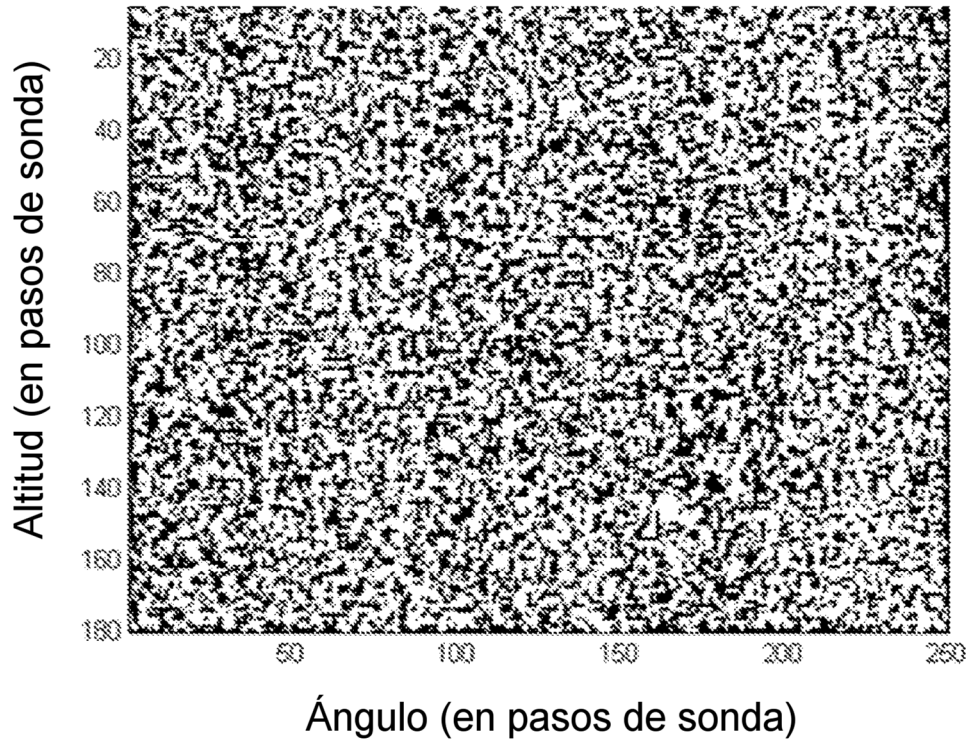


FIG 4

