

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 871 573**

51 Int. Cl.:

G01N 29/04 (2006.01)
G01H 5/00 (2006.01)
G01S 15/89 (2006.01)
G01N 29/06 (2006.01)
G01N 29/07 (2006.01)
G01N 29/26 (2006.01)
G01N 29/44 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.10.2017 PCT/EP2017/075814**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **19.04.2018 WO18069321**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.10.2017 E 17780437 (4)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.03.2021 EP 3526597**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de detección y caracterización de un elemento reflector en un objeto**

30 Prioridad:

12.10.2016 FR 1659860

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
29.10.2021

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**BREDIF, PHILIPPE;
IAKOVLEVA, EKATERINA;
LESSELIER, DOMINIQUE;
ROY, OLIVIER y
SY, KOMBOSSÉ**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 871 573 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 y dispositivo de detección y caracterización de un elemento reflector en un objeto

5 La invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo que permiten definir uno o varios modos de reconstrucción para detectar y caracterizar unos defectos, en concreto, por imagenología y por enfoque sintético multimodal.

También encuentra su aplicación en cualquier campo donde se busque detectar y caracterizar unos elementos capaces de reflejar una onda ultrasónica, estando los elementos ocultos en un objeto y pudiendo ser un defecto de estructura, una dislocación, una grieta, etc.

También se puede implementar para caracterizar el perfil de una pieza.

10 En el campo del control no destructivo, en la actualidad, están disponibles unas numerosas técnicas de imagenología ultrasónicas. Estas técnicas representan una herramienta mayor para las aplicaciones de control no destructivo de los materiales y de los ensamblajes en unos numerosos campos industriales pioneros, tales como la energía, la petroquímica, la siderurgia, los transportes. Permiten obtener una información de localización absoluta y unas descripciones cada vez más realistas de la morfología de los defectos de estructura.

15 Los métodos de caracterización están estrechamente relacionados con la imagenología ultrasónica. En este sentido, las técnicas de multielementos conocidas bajo la designación anglosajona "Phased Array" han mejorado considerablemente las posibilidades de análisis.

20 Los métodos de enfoque sintéticos, tales como los métodos de enfoque total o TFM (abreviatura anglosajona de Total Focussing Method) proponen, por ejemplo, una imagenología ecográfica realista del material inspeccionado, explotando una instrumentación de multielemento convencional. Las imágenes TFM aportan una resolución óptima en toda la vista obtenida. Por construcción, estas imágenes TFM ofrecen como ventajas que son poco sensibles a los efectos de sombreado y a los rebotes múltiples. Según los modos de propagación y la polaridad de las ondas seleccionadas, la imagenología TFM permite dibujar unos defectos de volumen o unos defectos planos verticales. Esta representación realista aporta una ventaja importante para la caracterización de los defectos, en particular, para
25 unas grietas. Por lo tanto, las imágenes TFM son más fáciles de analizar; presentan menos riesgos de interpretación errónea y permiten contemplar unos controles más rápidos por unos operarios menos especializados.

Los métodos de enfoque sintético producen unas imágenes por el encadenamiento de dos etapas principales: una etapa de adquisición de las señales ultrasónicas y una etapa de construcción de las imágenes a partir de los datos anteriormente grabados. Estas dos etapas se pueden realizar de diferentes maneras expuestas a continuación.

30 Uno de los principales tipos de grabaciones de las señales ultrasónicas sobre las que se aplicarán, a continuación, unos algoritmos de reconstrucción de los datos es la grabación de tipo FMC (Full Matrix Capture) o matriz de interelementos, tal como se describe en el documento de C. Holmes, B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox, titulado "Post-Processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation", NDT&E international vol. 38, pp. 701-711, por ejemplo. En este caso, para un sensor ultrasónico constituido por varios
35 elementos pilotables individualmente, este tipo de adquisición consiste en grabar un conjunto de $M \times N$ señales elementales, $S_{ij}(t)$, con $1 \leq i \leq M$ y $1 \leq j \leq N$, donde M y N representan respectivamente los números de elementos usados en transmisión y en recepción. El índice i denota el número del elemento transmisor y el índice j el del elemento receptor. Se pueden usar otros métodos de adquisición de datos conocidos por el experto en la materia, tales como la transmisión de onda plana conocida bajo la abreviación anglosajona PWI (Plane Wave Imaging) o el método
40 SAFT (abreviación anglosajona de Synthetic Aperture Focusing Technique).

Para la construcción de las imágenes, los métodos de enfoque sintético consisten en sumar, de forma coherente, las contribuciones extraídas de las señales ultrasónicas anteriormente grabadas en cada punto de la zona inspeccionada en un material. Estos métodos se pueden realizar en el campo temporal o frecuencial. De entre estos, el método TFM citado anteriormente constituye uno de estos principales métodos de imagenología. El algoritmo
45 asociado consiste en sumar de forma coherente la amplitud de las señales recibidas para obtener unas interferencias constructivas y, de este modo, unos máximos de amplitud, en el sitio donde están efectivamente localizados los defectos en el origen de los ecos ultrasónicos detectados. Se apoya principalmente en la explotación de los tiempos de vuelo evaluados teóricamente a partir de modelos directos. Este algoritmo se puede resumir en tres etapas:

- 50 1. La definición de una zona de reconstrucción (posiciones, dimensiones y número de puntos de cálculo),
2. Para cada punto P de la zona de reconstrucción definida y para cada par transmisor-receptor (i, j) , el cálculo del tiempo de vuelo teórico, correspondiendo $T_{ij}(P)$ al recorrido entre el transmisor i y el receptor j y que pasa por el punto P ,
3. Para cada punto P de la zona, el sumatorio de las amplitudes extraídas de las señales $S_{ij}(t)$ en el tiempo $t =$
55 $T_{ij}(P)$, lo que se puede escribir:

$$I(P) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(T_{ij}(P)) \quad (1).$$

Este enfoque se puede realizar considerando, en la segunda etapa, varios modos de propagación (directo, ecos de esquina, ecos indirectos...) y varios tipos de ondas (longitudinales L o transversales T), tales como se describen, por ejemplo, en el documento de A. Fidahoussen, P. Calmon, M. Lambert, S. Paillard, S. Chatillon, "Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data", Review of progress in QNDE, Vol. 29, pp. 847-854, 2010

S. Paillard y col: "New ultrasonic array imaging of crack-type defects based on simulation-helped processing", agosto de 2010, describe un método para generar una imagen de un defecto.

Las figuras 1a, 1b y 1c ilustran diferentes tipos de trayectos. Para el modo de reconstrucción directo, figura 1a, los recorridos involucrados corresponden a unos trayectos directos entre los diferentes elementos del sensor C y los puntos P de la zona de reconstrucción, es decir, sin rebote sobre el fondo de la pieza, como se ilustra en esta figura 1a. Para los modos de reconstrucción de ecos de esquina y de ecos indirectos, (figuras 1b y 1c), los trayectos tomados en cuenta para el cálculo de los tiempos de vuelo en la ecuación (1) pueden constar de una o varias reflexiones sobre el fondo de la pieza A en el transcurso del trayecto entre el elemento transmisor y el punto de la zona de reconstrucción y/o en el transcurso del trayecto entre el punto de reconstrucción y el elemento receptor. La polarización de la onda entre dos interacciones sucesivas, longitudinal o transversal se toma en cuenta, igualmente.

El hecho de que cada reconstrucción TFM esté asociada a un modo de propagación (directo, eco de esquina, rebotes múltiples en la pieza...), así como la polaridad de las ondas ultrasónicas (longitudinal o transversal), da lugar a un número importante de imágenes, de las que cada una puede llevar una información diferente y complementaria sobre la posición, sobre la naturaleza y sobre la geometría de los defectos buscados D.

La pertinencia de una imagen asociada a un modo de propagación dado varía en función de la configuración de control considerada (sensor usado, geometría de la pieza inspeccionada, posición y orientación del defecto...). Esta pertinencia no es, por lo demás, necesariamente verdadera para todos los puntos de una misma zona de reconstrucción.

La técnica anterior también describe un "contador de reflexiones", ilustrado en la figura 2. Para un defecto plano D de orientación conocida, este estimador consiste en contabilizar el número de pares de transmisores i y receptores j, para los que existe un trayecto que verifica la ley de Snell-Descartes (figura 3) según el modo de reconstrucción considerado. De este modo, para un modo de reconstrucción m, suponiendo que cada punto P de la zona de reconstrucción pertenezca a un defecto plano de normal \vec{n} , el Contador de Reflexiones anotado $C^m(P, \vec{n})$, está dado por:

$$C^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N c_{ij}^m(P, \vec{n}) \quad (2)$$

donde

$$c_{ij}^m = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$\vec{n}_{ij}^m(P)$: la normal formada por las direcciones de ida \vec{d}_i y vuelta \vec{d}_j de la onda,

i: índice elemento transmisor,

j: índice elemento receptor,

N: número de elementos transmisor-receptor que componen el traductor,

θ_j , el ángulo que forma la dirección de ida \vec{d}_i con la normal \vec{n}_{ij}^m para un modo de reconstrucción m y θ_r , el ángulo que forma la dirección de vuelta \vec{d}_r con la normal \vec{n}_{ij}^m para un modo de reconstrucción m.

Se describe un método de reconstrucción ultrasónica, por ejemplo, en el capítulo 5.3.2 de la tesis titulada "Développement de méthodes de reconstruction ultrasonore pour la localisation et la caractérisation de défauts" defendida por Alex Fidahoussen el 21 de septiembre de 2012.

En el siguiente ejemplo, figura 4, se considera un defecto plano D de orientación vertical, en un objeto A a inspeccionar, para una zona de reconstrucción dada Z_r y para una reconstrucción en modo eco de esquina (esto es, con un rebote sobre el fondo del objeto) que no toma en cuenta más que unas ondas transversales T. La evaluación del Contador de Reflexión $C^m(P, \vec{n})$ en cada punto P de esta zona de reconstrucción Z_r permite constituir una

5 cartografía (figura 5) cuyos valores están codificados según una paleta de colores representada en la figura por unas zonas de grises con matices. De este modo, para un modo de reconstrucción m , esta cartografía indica que en la zona Z1 (Amplitud = 0), no puede existir ningún trayecto especular entre un transmisor i , un defecto plano de orientación vertical y un receptor j . Este estimador aporta una información necesaria, pero no suficiente, para predecir completamente la pertinencia de un modo de reconstrucción para detectar un defecto plano de orientación conocida situado en la zona de reconstrucción. En efecto, el modo de reconstrucción no considera más que los trayectos geométricos y deben tomarse en cuenta, igualmente, otras consideraciones físicas.

La solicitud de patente francesa FR 3 029 636 describe un procedimiento de imagenología por ultrasonidos que usa un transductor de multielemento y basado en la técnica de reconstrucción llamada "enfoque en cualesquiera puntos".

10 Uno de los objetivos de la invención es proponer una herramienta que permita predecir, para una configuración del sistema de detección de defectos y un tipo de defectos buscados, el o los modos de reconstrucción m más pertinentes a usar para obtener una mejor visualización y caracterización de defectos presentes en una pieza. Más precisamente, para cada punto P perteneciente a una zona de reconstrucción Z_r , esta herramienta permite estimar la capacidad de un modo de reconstrucción para poder detectar o no, los rasgos de un defecto plano a partir de ecos especulares cuyo recorrido verifica la ley de Snell-Descartes, tal como se describe en el documento https://fr.wikipedia.org/wiki/Lois_de_Snell-Descartes o, de manera más general, para cualquier objeto o elemento plano de orientación conocida y que refleja las ondas ultrasónicas.

El o los modos de reconstrucción seleccionados a partir de los resultados sobre la capacidad de un modo se usarán, entonces, en un sistema de detección y de caracterización de defectos.

20 En concreto, la invención puede asimilarse a un estimador de ecos especulares para un modo de reconstrucción considerado. El estimador consiste, en concreto, en calcular, en cada punto de una zona de interés, la contribución unitaria de cada par transmisor-receptor (i, j) de un sensor de detección de un eco especular que proviene de un defecto plano de orientación predefinida. Este cálculo se puede realizar por medio de una herramienta de simulación de propagación de ondas elastodinámicas conocida por el experto en la materia.

25 El sumatorio de todas estas contribuciones (energía reflejada) en cada uno de los puntos de una zona de interés permite, entonces, predecir la amplitud de detección de un tipo de defecto por un eco especular. Una cartografía de estas amplitudes, análoga a la propuesta para el contador de reflexiones de la técnica anterior, pero más precisa, se puede realizar, de este modo y, a partir de esta cartografía, un operario podrá seleccionar uno o varios modos de reconstrucción para inspeccionar un objeto.

30 La invención se refiere a un procedimiento para determinar al menos un modo de reconstrucción m de un objeto reflector que presenta una parte capaz de generar unas reflexiones especulares de ondas ultrasónicas, dentro de un volumen dado Z_r , caracterizado porque incluye al menos las siguientes etapas:

- para cada punto P del volumen dado Z_r , determinar un valor de campo ultrasónico $A_{ij}^m(P)$ para N pares (i, j) de transmisores-receptores y para un modo de detección m ,

$$C^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N c_{ij}^m(P, \vec{n})$$

- 35 • calcular un número de reflexiones de la onda donde

$$c_{ij}^m = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

con $\vec{n}_{ij}^m(P)$ la normal formada por la dirección "ida" \vec{d}_i y la dirección "vuelta" \vec{d}_j de la onda ultrasónica transmitida y reflejada por el elemento reflector,

- 40 • calcular el valor de energía $E^m(P, \vec{n})$ para cada punto P de la zona Z_r , con \vec{n} la normal al elemento reflector y para varios modos de detección m , sumando sobre los N pares de transmisores-receptores, (i, j), el producto del valor de campo ultrasónico por el número de reflexiones de la onda: con

$$E^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N A_{ij}^m(P) c_{ij}^m(P, \vec{n})$$

- 45 • comparar dicho o dichos valores de energía $E^m(P, \vec{n})$ obtenidos con un criterio dado y, a partir del resultado obtenido, seleccionar al menos un modo de reconstrucción m a usar para detectar y caracterizar el elemento reflector.

Según una variante de realización, se determina el o los modos de reconstrucción m a usar eligiendo las energías $E^m(P, \vec{n})$ que son superiores a un valor umbral E_s .

5 Según otra variante, el o los modos de reconstrucción m a usar se determinan limitando el número de modo de reconstrucción a un valor dado, que ofrece el mejor compromiso entre energía y dimensión de la zona de reconstrucción seleccionada.

El cálculo de la energía puede tomar en cuenta los coeficientes de reflexión $R(\vec{n}_{ij}, \vec{n})$ correspondientes a la interacción de la onda con una superficie plana definida por la normal \vec{n} a un punto P :

$$E^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N A_{ij}^m(P) R(\vec{n}_{ij}, \vec{n}) c_{ij}^m(P, \vec{n}).$$

10 El valor de energía se determina, por ejemplo, teniendo en cuenta el número de reflexiones ponderado por una tolerancia arbitraria:

$$c_{ij}^m(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \pm \varepsilon \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

El elemento reflector a detectar puede ser un defecto plano dispuesto en una pieza a inspeccionar, tal como una falla, una muesca.

15 La invención también se refiere a un dispositivo para determinar al menos un modo de detección para un elemento reflector de ondas ultrasónicas, dentro de un volumen dado Z_r y por reflexiones especulares y caracterizar uno o varios defectos en una pieza A que incluye al menos un transductor ultrasónico para transmitir y recibir unas ondas ultrasónicas y un dispositivo de procesamiento adaptado para usar el o los modos de reconstrucción obtenidos por la implementación de las siguientes etapas:

20 • para cada punto P del volumen dado Z_r , determinar un valor de campo ultrasónico $A_{ij}^m(P)$ para N pares (i, j) de transmisores-receptores y para un modo de detección m ,

$$C^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N c_{ij}^m(P, \vec{n})$$

• calcular un número de reflexiones de la onda donde

$$c_{ij}^m = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

con $\vec{n}_{ij}^m(P)$ la normal formada por las direcciones "ida" \vec{d}_i y "vuelta" \vec{d}_j de la onda ultrasónica transmitida y reflejada por el elemento reflector.

25 • calcular el valor de energía $E^m(P, \vec{n})$ para cada punto P de la zona Z_r , con \vec{n} la normal al elemento reflector y para varios modos de detección m , sumando sobre los N pares de transmisores-receptores, (i, j) , el producto del valor de campo ultrasónico por el número de reflexiones de la onda:

con

$$E^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N A_{ij}^m(P) c_{ij}^m(P, \vec{n})$$

30 • comparar los valores de energías $E^m(P, \vec{n})$ obtenidos con un criterio dado y a partir del resultado obtenido seleccionar al menos un modo de reconstrucción m a usar para detectar y caracterizar el elemento reflector.

El procedimiento y el dispositivo se usan, por ejemplo, para la detección de defectos en una pieza sometida a unas ondas ultrasónicas.

35 La invención se comprenderá mejor y otras ventajas se pondrán de manifiesto con la lectura de la descripción que sigue, de ejemplos dados a título ilustrativo y en ningún caso limitativo, hecha respecto a las figuras que representan:

- Figuras 1a, 1b, 1c, una ilustración de los diferentes tipos de trayectos,
- Figura 2, una ilustración de un contador de reflexiones según la técnica anterior,

- Figura 3, una ilustración de un trayecto según la ley de Snell-Descartes,
- Figura 4, una ilustración de una zona de reconstrucción dentro de un objeto y Figura 5, una cartografía del estimador de "contador de reflexiones" según la técnica anterior para un modo de reconstrucción,
- Figura 6, un ejemplo de dispositivo para la implementación del procedimiento según la invención,
- Figura 7, un resultado de cartografía de las zonas de detección más favorables obtenida después de la implementación del procedimiento según la invención y
- Figura 8, una ilustración de la predicción de las posibilidades de detección por la invención, de dos defectos idénticos situados en dos regiones diferentes del objeto A.

La idea implementada para el procedimiento según la invención consiste, en concreto, en determinar un modo de reconstrucción adaptado, que permite obtener una imagen de un defecto de manera precisa y fiable, para una configuración de inspección conocida y un tipo de defecto buscado. A continuación, el modo obtenido, de este modo, se puede usar para la detección y la caracterización de defectos en un objeto a inspeccionar.

Para aplicarse, el procedimiento según la invención necesita conocer previamente un cierto número de información sobre la pieza a inspeccionar y el dispositivo de control. La información requerida es, entonces, la misma que la necesaria para la obtención de la imagen del defecto.

Esta información se refiere a:

- La pieza a inspeccionar:
 - El conocimiento de la geometría de la pieza según su espesor,
 - El conocimiento de las velocidades de propagación de las ondas de interés (ondas longitudinales L y transversales T),
 - La toma en cuenta de otras propiedades físicas: la anisotropía, la atenuación de las ondas consideradas, etc. para modelar la propagación de una onda en la pieza a estudiar y efectuar el cálculo del campo,
- El o los transductores de multielementos del sensor:
 - El corte elemental: lineal, matricial, anular...
 - El número de elementos considerados: N,
 - El paso, tomado de centro a centro, entre los elementos (pitch, paso) que constituyen el sensor, con el fin de calcular los tiempos de vuelo necesarios entre un transmisor, un punto de enfoque de la pieza y un receptor, siendo las coordenadas de los elementos del sensor conocidas,
 - El tipo de acoplamiento: acoplamiento por inmersión o por contacto,
 - La geometría de la zapata del sensor, así como sus propiedades físicas (velocidad de las ondas que la atraviesan), con el fin de estimar el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica en la zapata. El tiempo de vuelo total es la suma de los tiempos de recorrido en la zapata y del tiempo de recorrido en el material a inspeccionar,
- La o las posiciones del sensor sobre la pieza durante la adquisición de las señales:
 - El ajuste de los elementos transmisor y receptor, es decir, para cada disparo, la definición:
 - del o de los elementos activos en transmisión, con su ley de demoras asociada,
 - del o de los elementos activos en recepción, con su ley de demoras asociada.
- La orientación del defecto plano buscado, definida por su normal \vec{n} ,
- El conjunto de los modos de reconstrucción a considerar,
- La zona de interés Z_r en la que se efectúan las reconstrucciones.

Estos parámetros se implementan en el cálculo de la herramienta o estimador del modo de reconstrucción según la invención.

Para cada modo posible m de reconstrucción, la invención consiste en determinar, sobre la base de un estimador de ecos especulares, la capacidad de este modo para poder proporcionar o no, por unas reflexiones especulares, la imagen de un defecto plano de orientación conocida, situado en cualquier punto P de la zona de interés Z_r o zona de reconstrucción. Para esto, el estimador debe proporcionar, sobre toda esta zona de reconstrucción Z_r , una estimación de la energía ultrasónica reflejada según este tipo de reflexiones, por ejemplo. Cuanto más importante sea la energía calculada por el estimador, mejor será la capacidad de detección del modo de reconstrucción considerado. El estimador es, por lo demás, capaz de proporcionar unos valores de energía comparables entre todos los modos de reconstrucción considerados. El modo de reconstrucción por el que se opte se podrá implementar, entonces, en un sistema de detección y de caracterización de defectos. Las etapas que permiten obtener este estimador se detallan más adelante en la descripción.

La figura 6 ilustra un ejemplo de dispositivo que permite la implementación del estimador según la invención durante la inspección de una pieza. El dispositivo comprende un sensor 61 (transductor ultrasónico, por ejemplo) que comprende varios elementos transmisores-receptores 62(i,j), bajo forma de barra lineal, por ejemplo, adaptados

5 para transmitir y para recibir unas ondas ultrasónicas, el detector se posiciona, por ejemplo, sobre un soporte 63. Los transmisores-receptores transmiten unas ondas ultrasónicas que se reflejan dentro de la pieza que puede contener un defecto D. Las señales reflejadas son captadas por la matriz de recepción (receptores) y digitalizadas según un principio conocido por el experto en la materia. Las señales digitales correspondientes son, por ejemplo, memorizadas en un archivo o una memoria (no representados por unas razones de simplificación) para ser procesadas en tiempo real o en tiempo diferido. Simultáneamente, se memoriza la posición del sensor correspondiente a una grabación de señales reflejadas y captadas por la matriz de recepción del sensor.

10 El procedimiento según la invención ha permitido obtener una herramienta o estimador que va a permitir, por ejemplo, seleccionar uno o varios modos de reconstrucción más eficientes para detectar los defectos en una pieza examinada. Una forma de implementar este estimador consiste, por ejemplo, en transmitir los datos experimentales de las señales digitalizadas y de la posición del sensor de detección a un dispositivo de procesamiento 65 que comprende un procesador 66 sobre el que se ejecuta el estimador 67, con el fin de reconstruir una imagen de la pieza inspeccionada a partir de señales recibidas sobre el sensor de detección y memorizadas, por ejemplo, en una base de datos 68.

15 El procesador también puede incluir una salida conectada a un dispositivo de visualización 69 de los valores obtenidos, de este modo, que puede presentarse bajo la forma de una cartografía que permite a un operario identificar las zonas de la pieza en las que se podrá detectar mejor un defecto, en función de un modo de reconstrucción y, por lo tanto, seleccionar el mejor modo de reconstrucción.

20 El procedimiento y el dispositivo según la invención se pueden usar en el caso de control de inmersión que supone que el dispositivo está sumergido en un líquido, agua en la mayor parte de los casos, propagándose, entonces, las ondas en el líquido antes de ser refractadas en el material. Según otra aplicación, se implementa para unos controles por contacto que suponen que el sensor se coloca sobre una zapata que constituye, entonces, el medio intermedio entre el sensor y la pieza a inspeccionar.

25 Para la implementación del procedimiento según la invención, se define una malla al nivel de la zona de detección, con el fin de identificar los puntos P considerados en el procedimiento según la invención. La letra P designa los puntos de la malla cualquiera que sea su coordenada. La malla se define como un compromiso entre la obtención de una imagen de calidad y el tiempo de cálculo. Por ejemplo, el paso de la malla será del orden de $\lambda/6$ con λ el valor de la longitud de onda o también estará comprendido en el intervalo $[\lambda/8, \lambda/4]$.

30 La amplitud de detección (esto es, la energía E_d) para un defecto D se puede determinar, entonces, por sumatorio de las contribuciones unitarias, de cada par transmisor-receptor, calculadas en cada uno de los puntos P de la malla de la zona de reconstrucción Z_r .

35 Para un modo de reconstrucción m , el estimador de ecos especulares, en su expresión más simple, consiste, en primer lugar, en calcular las siguientes cantidades unitarias, en cada punto P de la zona de interés para los siguientes parámetros: $A_{ij}^m(P)$: el campo ultrasónico para cada conjunto de transmisor(es) i y de receptor(es) j según el ajuste definido durante la adquisición. Por ajuste, se hace referencia al conjunto de los parámetros de adquisición que deben tomarse en cuenta para el cálculo del campo, listados anteriormente. Esta magnitud se puede calcular por medio de un software de simulación de propagación de ondas elastodinámicas, por ejemplo, el software citado anteriormente CIVA desarrollado y comercializado por el CEA, disponible en la publicación, "CIVA: An expertise platform for simulation and processing NDT data", Ultrasonics volume 44 Supplement, 22 de diciembre de 40 2006, Páginas e975-e979, Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU),

- $c_{ij}^m(P)$: el contador de reflexiones igual a 1 si $\vec{n}_{ij}^m(P)$ es colineal a la normal en el defecto \vec{n} y a 0 si no. Una forma de estimar $c_{ij}^m(P)$ puede ser dada por:

$$c_{ij}^m(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (3)$$

45 con $\vec{n}_{ij}^m(P)$ la normal formada por la dirección "ida" \vec{d}_i y la dirección "vuelta" \vec{d}_j , para el modo de reconstrucción m , correspondientes respectivamente al recorrido de la onda ultrasónica asociado al conjunto del o de los transmisores i y al recorrido de la onda ultrasónica asociada al conjunto del o de los receptores j . d_i designa la dirección del trayecto de la onda ultrasónica que proviene del elemento i y que llega a P y d_j , la dirección del trayecto ultrasónico reflejada en P y que vuelve hacia el elemento j del sensor. Estos trayectos pueden ser 50 directos o mediante un rebote en la pieza inspeccionada.

Las contribuciones unitarias de cada elemento del sensor, para un modo dado m y para un punto P de la malla

resultan, entonces, del producto del campo $A_{ij}^m(P)$ por el contador de reflexión $c_{ij}^m(P)$.

La energía ultrasónica final buscada (para seleccionar el modo de reconstrucción más apropiado para detectar y caracterizar un defecto) se determina, entonces, sumando todas las contribuciones unitarias en cada punto P de la zona de reconstrucción. Los puntos de la zona de reconstrucción se distribuyen, por ejemplo, bajo la forma de una cuadrícula cuyos vértices corresponden a los puntos P . Anotando esta energía $E^m(P, \vec{n})$, una forma de estimarla está dada por la siguiente relación:

$$E^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N A_{ij}^m(P) c_{ij}^m(P, \vec{n}) \quad (4).$$

Para el modo de reconstrucción m , se obtiene un valor de energía $E^m(P, \vec{n})$ correspondiente a la energía ultrasónica recogida por el sensor (conjunto de los elementos) después de reflexión sobre un defecto plano de orientación conocida para un punto de la malla P .

El cálculo de la energía se efectúa para varios modos posibles de reconstrucción m , para el conjunto de los puntos P de la malla y sobre una zona de reconstrucción considerada. Estos valores de energía se pueden representar bajo la forma de una cartografía o de una tabla que indica para cada punto dado P de la malla, el valor de energía correspondiente, para un modo de reconstrucción.

A continuación, el procedimiento va a explotar estos resultados, con el fin de definir el modo de reconstrucción m más apropiado para detectar y caracterizar un defecto plano presente en la zona de reconstrucción.

Según una variante de realización, el procedimiento va a seleccionar el valor de energía máxima en la tabla y a seleccionar el modo de reconstrucción m correspondiente a este valor, por ejemplo, para ejecutar un algoritmo de búsqueda de defectos.

Por ejemplo, es posible comparar el o los valores de energías $E^m(P, \vec{n})$ con un valor umbral E_s y, a partir del resultado procedente de la comparación, seleccionar los valores de energía superiores a este valor umbral y, por lo tanto, los modos a usar para detectar y caracterizar un defecto en una zona de reconstrucción dada.

Otra manera de proceder consiste en usar un intervalo de valores de energía $[E_{\min}, E_{\max}]$ para seleccionar los modos a usar limitándose a un número dado de modos de reconstrucción. En esta variante, la elección del o de los modos de reconstrucción a usar, resulta de un compromiso entre el número de modos de reconstrucción y los valores de energía que permiten una buena visualización de los defectos.

Según otra variante de realización, es posible mejorar el estimador definido, en concreto, por la fórmula (4) tomando en cuenta otras cantidades físicas, tales como los coeficientes de reflexión $R(\vec{n}_{ij}, \vec{n})$ correspondientes a la interacción de la onda con una superficie plana definida por la normal \vec{n} al punto P . $R(\vec{n}_{ij}, \vec{n})$ puede definirse por unas fórmulas analíticas o por un software de simulación de propagación de ondas elastodinámicas conocido por el experto en la materia, tal como el software CIVA citado anteriormente.

Una forma de tomar en cuenta los coeficientes de reflexión es la siguiente:

$$E^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N A_{ij}^m(P) R(\vec{n}_{ij}, \vec{n}) c_{ij}^m(P, \vec{n}) \quad (5).$$

Otra variante consiste en aplicar una tolerancia arbitraria (ϵ) al contador de reflexiones $c_{ij}^m(P)$, considerando los siguientes valores del contador:

$$c_{ij}^m(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \pm \epsilon \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (6).$$

El estimador según la invención permite, en concreto, obtener una cartografía más precisa que las obtenidas por la implementación de los métodos conocidos de la técnica anterior y seleccionar un modo de reconstrucción mejor adaptado para la geometría de una pieza y para un defecto.

La figura 7 ilustra el resultado obtenido por la implementación del procedimiento según la invención. Este estimador de ecos especulares se puede representar bajo forma de cartografía que muestra el reparto espacial de la energía en la zona de interés Z_r . En este caso, la amplitud de las energías en cada punto P está codificada sobre una paleta de colores, representada por unas zonas de grises con matices en la figura 7 con una escala correspondiente a la amplitud de los ecos especulares.

5 Un ejemplo de cartografía obtenida por la fórmula (4) se ilustra en la figura 8 para un modo de reconstrucción TTT y para dos defectos planos situados en dos sitios de la pieza. En este ejemplo, gracias a la información proporcionada por este estimador, es posible predecir que la capacidad del modo de reconstrucción considerado para detectar un defecto plano vertical es proporcional a la energía calculada. De este modo, en las regiones donde la energía es escasa (incluso nula), este tipo de defecto no se detectará y, de manera inversa, en las regiones donde la energía es importante, las posibilidades de detección serán máximas. Por ejemplo, para la zona 80, que es una región de fuerte detectabilidad, el defecto plano D1 se detecta correctamente sobre toda su altura, como se ilustra en 81. Para la zona 83 con detectabilidad más escasa, el defecto vertical D2 se detecta mal, lo que se representa en 84.

10 La descripción se aplica para diferentes modos de reconstrucción, por ejemplo, el modo TLT, el modo TTL, el modo LLT o unos modos de reconstrucción conocidos por el experto en la materia, tales como los descritos en el documento de Jie Zhang y col, titulado "Defect detection using ultrasonic arrays: the multi-mode total focusing method", NDT&E International, 43(2010) 123-133.

15 El procedimiento según la invención permite predecir cuantitativamente, para una configuración dada, la capacidad de un modo de reconstrucción para poder detectar un elemento reflector en una región precisa de una zona inspeccionada.

Las aplicaciones son diversas, tales como la detección y la caracterización (naturaleza, posición, orientación) de defectos en el control no destructivo por ultrasonidos.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar al menos un modo de reconstrucción m de un objeto reflector que presenta una parte capaz de generar reflexiones especulares de ondas ultrasónicas, dentro de un volumen dado Z_r , **caracterizado porque** incluye al menos las siguientes etapas:

- 5 • para cada punto P del volumen dado Z_r , determinar un valor de campo ultrasónico $A_{ij}^m(P)$ para N pares (i, j) de transmisores-receptores y para un modo de detección m ,

$$C^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N c_{ij}^m(P, \vec{n})$$

- calcular un número de reflexiones de la onda donde

$$c_{ij}^m = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

10 con $\vec{n}_{ij}^m(P)$ la normal formada por la dirección "ida" \vec{d}_i y la dirección "vuelta" \vec{d}_j de la onda ultrasónica transmitida y reflejada por el elemento reflector,

- calcular el valor de energía $E^m(P, \vec{n})$ para cada punto P de la zona Z_r , con \vec{n} la normal al elemento reflector y para varios modos de detección m , sumando sobre los N pares de transmisores-receptores, (i, j) , el producto del valor de campo ultrasónico por el número de reflexiones de la onda: con

$$E^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N A_{ij}^m(P) c_{ij}^m(P, \vec{n})$$

- 15 • comparar dicho o dichos valores de energías $E^m(P, \vec{n})$ obtenidos con un criterio dado y a partir del resultado obtenido seleccionar al menos un modo de reconstrucción m a usar para detectar y caracterizar el elemento reflector.

2. Procedimiento según la reivindicación 1 **caracterizado porque** se determina el o los modos de reconstrucción m a usar eligiendo los valores de energías $E^m(P, \vec{n})$ que son superiores a un valor umbral E_s .

- 20 3. Procedimiento según la reivindicación 1 **caracterizado porque** se determina el o los modos de reconstrucción m a usar limitando el número de modo de reconstrucción a un valor dado, que ofrece el mejor compromiso entre energía y dimensión de la zona de reconstrucción seleccionada.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3 **caracterizado porque** el cálculo de la energía toma en cuenta los coeficientes de reflexión $R(\vec{n}_{ij}, \vec{n})$ correspondientes a la interacción de la onda con una superficie plana definida por la normal \vec{n} a un punto P :

$$E^m(P, \vec{n}) = \sum_{i,j=1}^N A_{ij}^m(P) R(\vec{n}_{ij}, \vec{n}) c_{ij}^m(P, \vec{n}).$$

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4 **caracterizado porque** el valor de energía se determina teniendo en cuenta el número de reflexiones ponderado por una tolerancia arbitraria:

$$c_{ij}^m(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\vec{n}_{ij}^m(P) \cdot \vec{n}| = 1 \pm \varepsilon \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

- 30 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 **caracterizado porque** el elemento reflector es un defecto plano dispuesto en una pieza a inspeccionar, tal como una falla, una muesca.

7. Dispositivo para determinar al menos un modo de detección para un elemento reflector de ondas ultrasónicas, dentro de un volumen dado Z_r y por reflexiones especulares y caracterizar uno o varios defectos en una pieza A que incluye un transductor ultrasónico (61) para transmitir y recibir ondas ultrasónicas y al menos un dispositivo de procesamiento (65), dicho dispositivo de procesamiento está configurado para ejecutar el procedimiento según la reivindicación 1 y para determinar y ejecutar el o los modos de reconstrucción obtenidos por la implementación de las etapas del procedimiento según la reivindicación 1, con el fin de reconstruir una imagen de la pieza inspeccionada a partir de señales recibidas en el transductor ultrasónico.

- 35

8. Aplicación del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6 para la detección de defectos en una pieza sometida a ondas ultrasónicas.

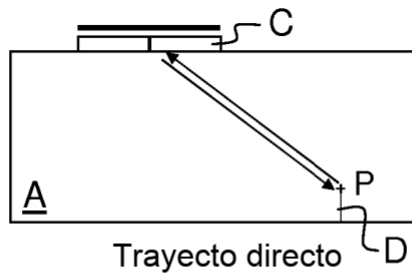


FIG.1a

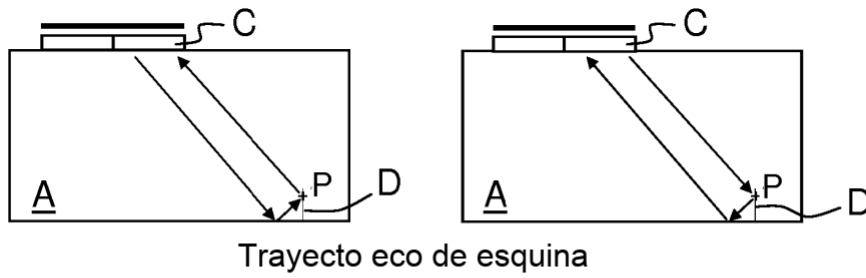


FIG.1b

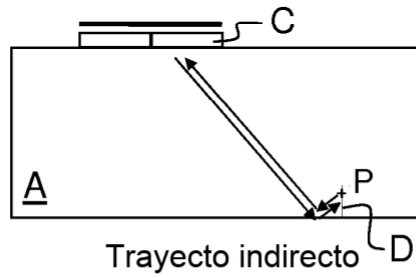


FIG.1c

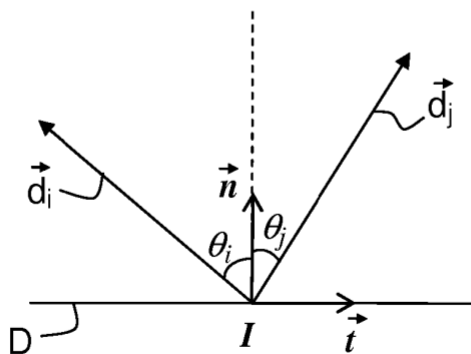


FIG.2

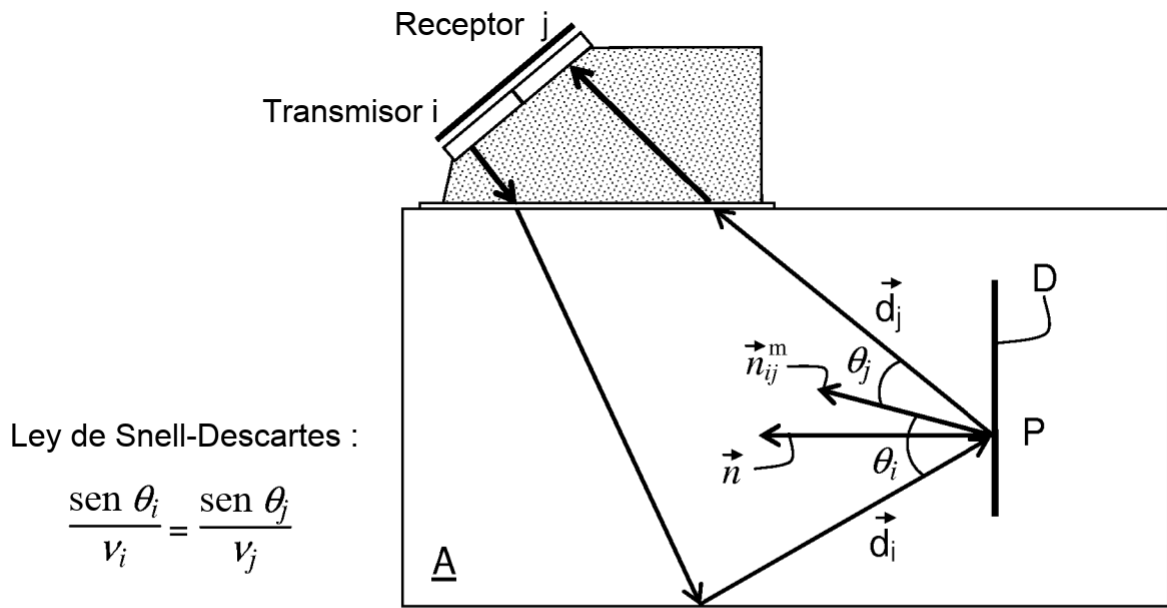


FIG.3

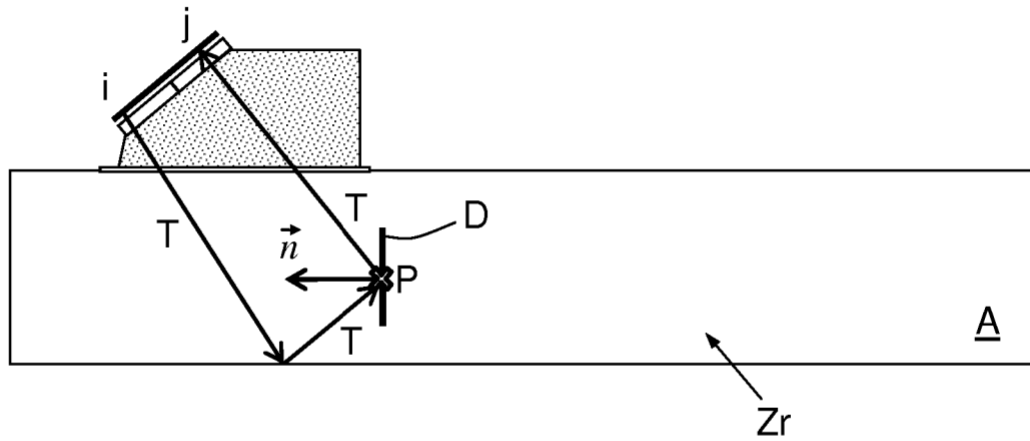


FIG.4

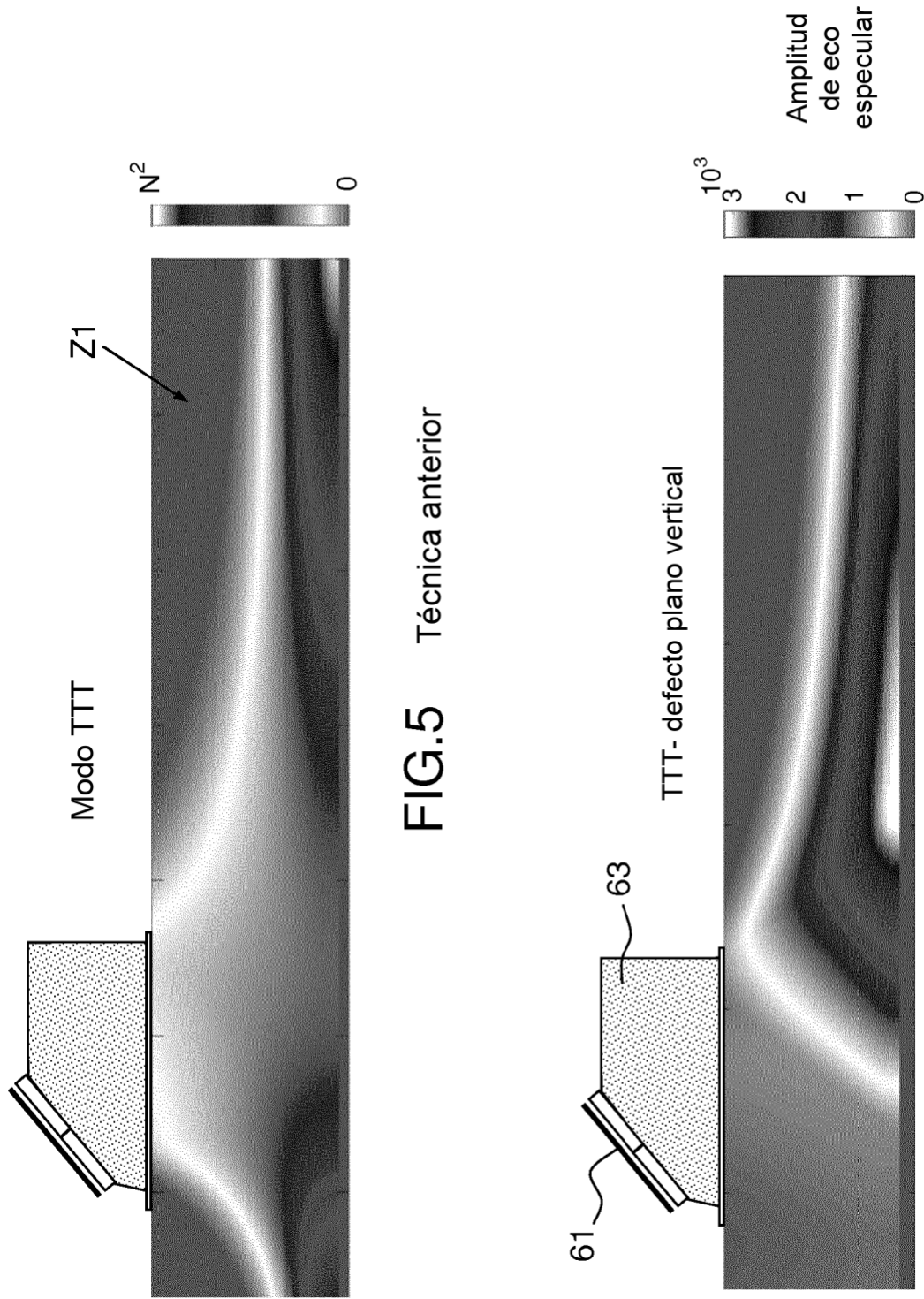


FIG.5 Técnica anterior

FIG.7

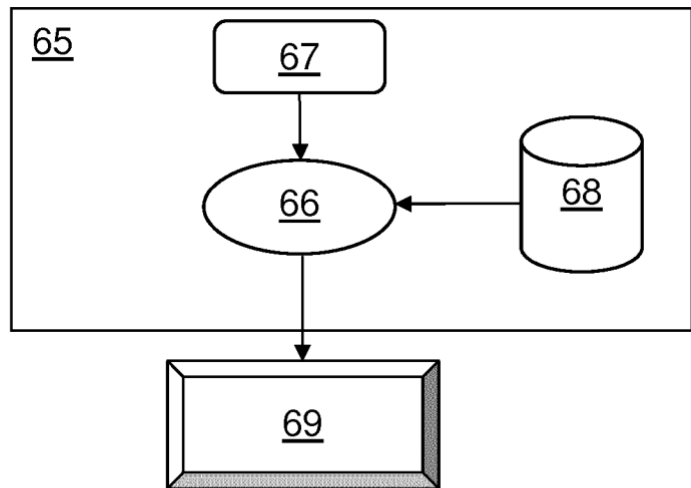
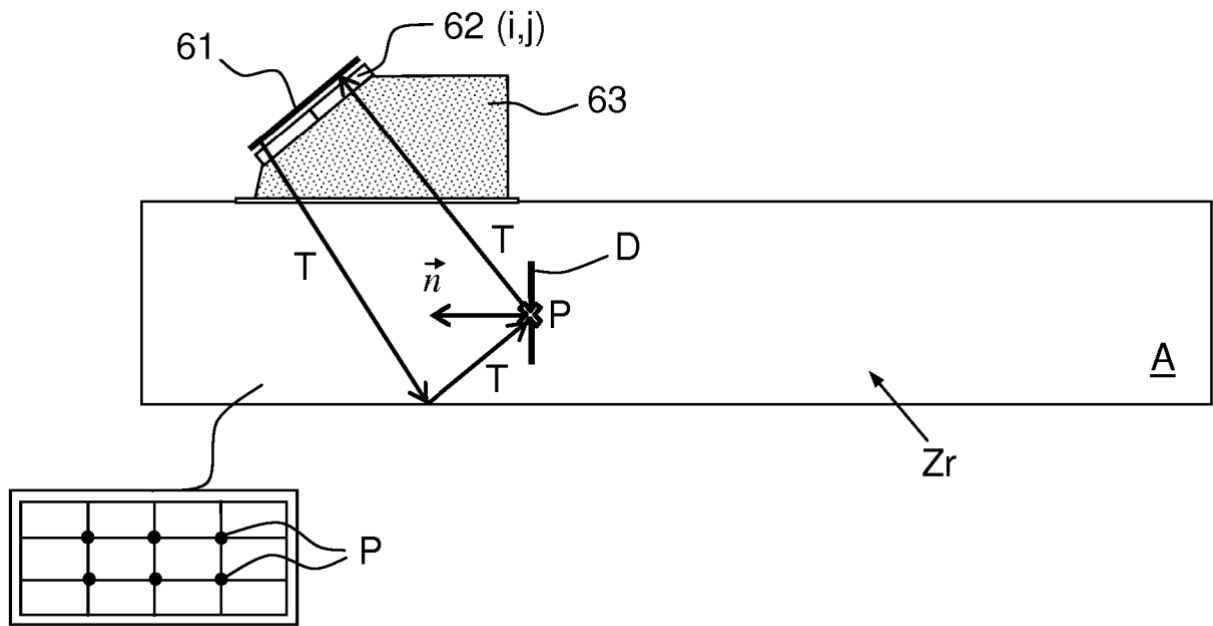


FIG.6

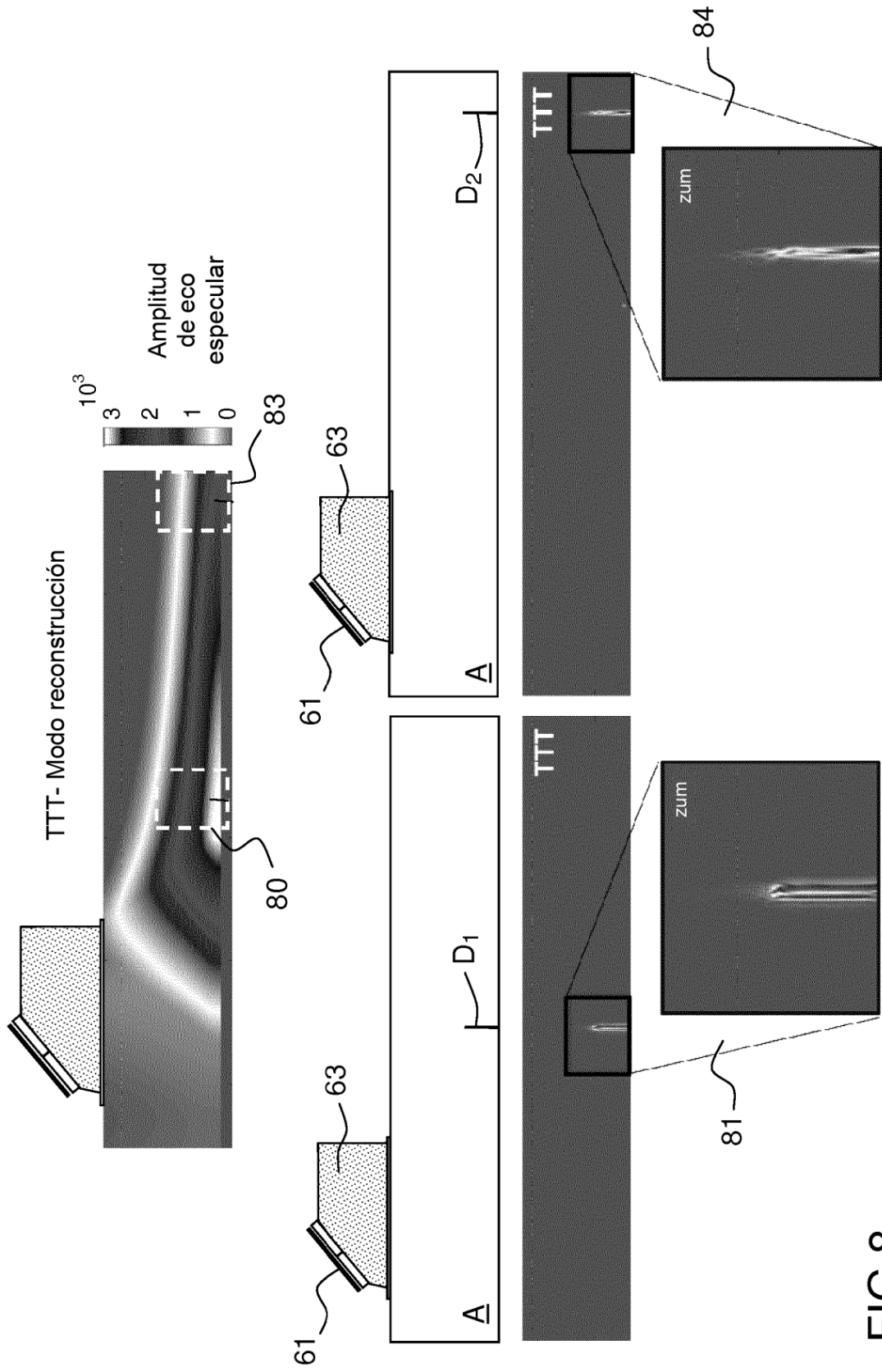


FIG.8