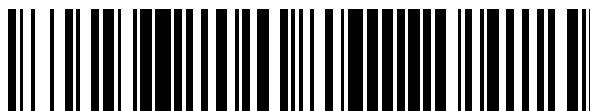


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 559 047**

51 Int. Cl.:

**G01N 29/26** (2006.01)

**G01N 29/44** (2006.01)

**G01N 29/06** (2006.01)

**G01B 17/06** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.10.2012 E 12794408 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.10.2015 EP 2780699**

54 Título: **Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto por sondeo ecográfico, programa de ordenador correspondiente y dispositivo de sondeo ultrasónico**

30 Prioridad:

**15.11.2011 FR 1160399**

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

**10.02.2016**

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:

**ROBERT, SÉBASTIEN;  
CASULA, OLIVIER y  
IAKOVLEVA, EKATERINA**

74 Agente/Representante:

**AZNÁREZ URBIETA, Pablo**

**ES 2 559 047 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 reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto por sondeo ecográfico, programa de ordenador correspondiente y dispositivo de sondeo ultrasónico**

5 La presente invención se refiere a un proceso de reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto por sondeo ecográfico con ayuda de una sonda de ultrasonidos equipada con una pluralidad de transductores. También se refiere a un programa de ordenador y una sonda de ultrasonidos para la realización de dicho procedimiento.

10 Principalmente la invención se aplica al control no destructivo de piezas mecánicas de forma compleja, en particular durante un control por inmersión en el cual una pieza mecánica se sumerge en un líquido para ser sondeada a distancia, por ejemplo en el sector aeronáutico. Sin embargo, también se puede aplicar durante un control por contacto directo entre la sonda y la pieza mecánica a sondear cuando se requiere determinar una superficie compleja del fondo de dicha pieza. En general, se refiere a campos de aplicación variados y puede emplearse cuando se quiere reconstruir la geometría de un objeto o de una interfaz con ayuda de ondas ultrasónicas y de una sonda con transductores múltiples. Se puede citar por ejemplo el ámbito médico, la acústica submarina, sónares, etc.

20 Se conocen métodos de sondeo por barrido electrónico para determinar con precisión la superficie *a priori* desconocida de un objeto. Lamentablemente, estos métodos, debido a que están basados en una limitación para tratamientos sucesivos e independientes realizados por los transductores de la sonda, antes de emitir una señal cada transductor debe esperar a que el transductor anterior haya tratado el eco de su propia señal, con lo que el tratamiento global de la superficie es prolongado. Por ello, estos métodos no están adaptados a sistemas implementados para controles a alta velocidad. Además, debido a que estos métodos están basados en el tratamiento de señales provenientes de un único transductor cada vez, los ecos de superficie enviados durante un sondeo ecográfico pueden tener una amplitud insuficiente para obtener medidas fiables o completas.

25 Así, es preferible un proceso denominado en "tiempo real", es decir que no presenta dicho inconveniente, aunque las emisiones pueden realizarse por los transductores según una cierta ley de retardo.

Así, la invención se refiere en particular a un procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto que comprende las etapas siguientes:

- 30
- controlar los transductores para que emitan hacia la superficie del objeto ondas ultrasónicas que presentan retardos de emisión iniciales unas con respecto a otras,
  - ejecutar al menos una vez el bucle de etapas siguiente, de manera que se obtenga, después de al menos una iteración, un frente de onda que se recibe simultáneamente en la superficie:
    - 35 • recibir desde los transductores señales de medida intermedias, que miden en particular los ecos por reflexión de las ondas ultrasónicas en la superficie del objeto,
    - corregir los retardos de emisión de los transductores mediante señales de medida intermedias y controlar los transductores para que emitan hacia la superficie del objeto ondas ultrasónicas con retardos de emisión corregidos unas con respecto a otras,
  - 40 – recibir desde los transductores señales de medida finales que resultan de la reflexión de un frente de onda recibido simultáneamente en la superficie del objeto.

Un proceso de este tipo se describe por ejemplo, en la solicitud de patente publicada con el número US 2006/0195273 A1.

45 Más precisamente, en este documento se describe un proceso donde el bucle solo se ejecuta una vez y según el cual la etapa de corrección de los retardos de emisión iniciales a partir de las señales de medida intermedias consiste en proceder en dos tiempos: en primer lugar, la estimación de la superficie desconocida del objeto se calcula explícitamente a partir de las señales de medida intermedias obtenidas durante el primer disparo; y después se calcula una ley de retardos a partir de dicho contorno y se aplica a partir del segundo disparo.

50 También más precisamente, en este documento los retardos de emisión iniciales son retardos nulos. Por tanto, en el segundo disparo no existe explícitamente una corrección de los retardos de emisión iniciales, sino la aplicación directa de la ley de retardos establecida a partir de la superficie estimada del objeto.

Este proceso en "tiempo real" se estableció para el control de estructuras complejas con componentes estratificados, es decir, una matriz de resina orgánica reforzada con tejidos de fibras de carbono, y se aplica en particular para detectar defectos de tipo deslaminación con orientación casi paralela a la superficie de la

pieza. Permite conformar un frente de onda incidente con la misma curvatura que la superficie de la pieza. La onda es transmitida entonces a la pieza en incidencia normal en todos los puntos de la superficie, lo que optimiza la detección de defectos con respecto a una emisión ultrasónica no adaptada a la geometría de la pieza. La detección y la localización de los defectos se realiza por análisis del B-scan obtenido (representación acumulada de las N señales de medición finales recibidas por los N transductores de la sonda). Este proceso se adapta particularmente a aquellos materiales compuestos estratificados donde los pliegues tienen una orientación casi paralela a la superficie e intervienen, de hecho, en la degradación de la onda ultrasónica transmitida si ésta no está adaptada a la geometría del objeto. Además, dicho principio responde bien a dicha problemática, ya que los defectos buscados son deslaminaciones entre pliegues del compuesto y, por ello, tienen geometrías casi paralelas a la superficie del objeto. Además, dicho proceso no se limita a este tipo de materiales, también puede ser aplicado al control de otros materiales, por ejemplo metálicos.

Finalmente, dicho proceso se ha generalizado para controlar objetos que presentan geometrías más complejas y, en particular, para adaptarse a cualquier tipo de superficie, ya sea cóncava, convexa o plana con una fuerte inclinación. En efecto, cuando la superficie a determinar del objeto presenta importantes variaciones de geometría, se mantienen fuertes interferencias entre las ondas emitidas por los transductores y reflejadas por el objeto y alteran incluso el B-scan aún después de la aplicación del proceso descrito en la solicitud de patente US 2006/0195273 A1.

Así, en el artículo de S. Robert y col., "Méthode ultrasonores de détection et d'imagerie temps-réelimplémentées dans les systèmes d'acquisition M2M" publicado en las jornadas Cofrend 2011, "Conferencias y exposición sobre los ensayos no destructivos", del 24 al 27 de mayo de 2011 en Dunkerque (FR), más concretamente en el capítulo 3 de dicho documento, se propone repetir el bucle de etapas anteriormente citado con el fin de converger, mediante iteraciones sucesivas, a una recepción realmente simultánea del frente de onda en la superficie a determinar, librándose de las interferencias incluso en presencia de una superficie muy compleja. El B-scan obtenido es entonces de mayor calidad y permite básicamente una mejor detección de los posibles defectos. En general, 4 o 5 iteraciones del bucle de etapas pueden ser suficiente para lograr un resultado conveniente, cualquiera que sea el tipo de geometría inspeccionada. De este modo, el proceso permite inspeccionar las diferentes geometrías (planas con o sin inclinación, cóncavas, convexas) de un mismo objeto utilizando una sonda única, por ejemplo una sonda convencional con una geometría plana de transductores.

Por el contrario, debido a la ley de retardo final aplicada, dicho B-scan proporciona una representación deformada del objeto sondeado, en particular de la superficie alcanzada simultáneamente por el frente de onda, ya que ésta se presenta entonces lógicamente bajo una forma plana. La representación bruta de los resultados adquiridos bajo la forma de un B-scan no es suficiente para localizar y caracterizar un defecto con precisión. Para ello, el proceso debe incluir el conocimiento de la superficie del objeto.

Por tanto, es deseable prever un proceso de determinación de una superficie de un objeto por sondeo ecográfico que permita liberarse de al menos parte de los problemas e inconvenientes indicados anteriormente, pero que siga siendo en "tiempo real" en el sentido citado.

Así, se propone un proceso de reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto por sondeo ecográfico mediante una sonda ultrasónica provista con una pluralidad de transductores que comprende las etapas siguientes:

- controlar los transductores para que emitan hacia la superficie del objeto ondas ultrasónicas que presentan retardos de emisión iniciales unas con respecto a otras,
  - ejecutar al menos una vez el bucle de etapas siguiente, de manera que se obtenga, después de al menos una iteración, un frente de onda que se recibe simultáneamente en la superficie:
    - recibir desde los transductores señales de medida intermedias, que miden en particular los ecos por reflexión de las ondas ultrasónicas en la superficie del objeto,
    - corregir los retardos de emisión de los transductores mediante señales de medida intermedias y controlar los transductores para que emitan hacia la superficie del objeto ondas ultrasónicas con retardos de emisión corregidos unas con respecto a otras,
  - recibir desde los transductores señales de medida finales que resultan de la reflexión de un frente de onda recibido simultáneamente en la superficie del objeto
- comprendiendo este proceso además las etapas siguientes:
- determinar tiempos de vuelo especulares entre cada transductor y la superficie del objeto a partir de las señales de medida finales y de los retardos de emisión corregidos, y
  - reconstruir geométricamente la superficie del objeto a partir de los tiempos de vuelo especulares determinados.

5 Por "tiempo de vuelo especular" entre un transductor y la superficie del objeto se entiende el tiempo mínimo empleado por una señal emitida por dicho transductor para retornar en forma de eco después de una reflexión contra la superficie del objeto. El tiempo de vuelo especular representa entonces la distancia más corta que separa el transductor de la superficie del objeto, es decir el segmento de recta normal en esta superficie y que pasa por el transductor.

De este modo, considerando hábilmente el resultado de la medida final realizada por los transductores para determinar los tiempos de vuelo especulares ligados a cada transductor, según el tipo de sonda con transductores múltiples utilizada, lineal o respectivamente matricial, es posible reconstruir con precisión la geometría bidimensional o tridimensional de la superficie detectada.

10 Opcionalmente la determinación de los tiempos de vuelo especulares comprende:

- determinar un tiempo de vuelo de ida y vuelta común a todos los transductores del frente de onda recibido simultáneamente en la superficie del objeto, y
- calcular los tiempos de vuelo especulares, a partir de dicho tiempo de vuelo de ida y vuelta, de los retardos de emisión corregidos y de las diferencias de recepción aplicadas a los transductores.

15 También opcionalmente, la reconstrucción geométrica de la superficie comprende:

- determinarlas distancias que separan cada transductor de la superficie a partir de los tiempos de vuelo especulares determinados,
- calcularlas coordenadas de puntos de dicha superficie en función de las coordenadas de los transductores y de las distancias determinadas y,
- 20 - reconstruir geoméricamentela superficie por interpolación entre dichos puntos.

También opcionalmente, el cálculo de las coordenadas de los puntos de la superficie está basado en la hipótesis de que dicha superficie es tangencial a un conjunto de esferas centradas respectivamente en los transductores y de radios respectivos correspondientes a las distancias determinadas.

25 También de forma opcional, los transductores están dispuestos linealmente y la reconstrucción geométrica de la superficie comprende reconstruir un perfil de dicha superficie en el plano de control de la sonda.

Por "plano de control de la sonda", terminología conocida en el campo del control no destructivo, se entiende el plano principal de emisión de los transductores.

30 También de forma opcional, N transductores están dispuestos linealmente, donde las coordenadas de sus centros pueden expresarse de la forma  $(c_n, 0)$  en un punto de referencia  $(O, x, y)$  ligado a la sonda, calculándose las coordenadas  $(x_n, y_n)$  de dichos puntos de la superficie de la siguiente manera:

$$\forall n, 1 \leq n \leq N-1, \begin{cases} x_n = c_n - d_n \cdot d_n' \\ y_n = d_n \sqrt{1 - d_n'^2} \end{cases}, \text{ donde } d_n' = \frac{d_{n+1} - d_n}{c_{n+1} - c_n}, \text{ siendo } d_n \text{ la distancia que separa el } n\text{-ésimo transductor de dicha superficie.}$$

También de modo opcional, los transductores están dispuestos bidimensionalmente en matriz y la reconstrucción geométrica de la superficie comprende una reconstrucción tridimensional de esta superficie.

35 También opcionalmente, la reconstrucción geométrica de la superficie se realiza por interpolación lineal o bilineal entre dichos puntos.

40 La invención tiene también por objeto un programa de ordenador descargable desde una red de comunicación y/o grabado en un soporte legible por ordenador y/o ejecutable por un procesador, que comprende instrucciones para la ejecución de las etapas de un proceso de reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto por sondeo ecográfico según la invención, cuando dicho programa es ejecutado en un ordenador.

Finalmente, la invención tiene igualmente por objeto un dispositivo de sondeo por ultrasonidos que comprende:

- una sonda incluyendo una caja y múltiples transductores ultrasónicosunidos a la caja,
- 45 - medios de mando y de tratamiento diseñados para la ejecución de un proceso de reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto según la invención.

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

- Figura 1: representa esquemáticamente la estructura general de un dispositivo de sondeo ultrasónico según una forma de realización de la invención,
- 5 Figura 2: ilustra las etapas sucesivas de un proceso de determinación de la superficie de objeto realizado con el dispositivo de sondeo de la figura 1,
- Figura 3: representa un primer ejemplo de utilización de la sonda de la figura 1 para sondear un objeto cuya geometría es representativa de un burlete de soldadura,
- 10 Figuras 4 a 7: B-scan obtenidos a partir de las señales de medida del objeto con burletes de soldadura de la figura 3, para, respectivamente, una primera, una segunda, una tercera y una cuarta iteración de un bucle de etapas del proceso de la figura 2,
- Figuras 8A, 8B y 8C: ilustran mediante diagramas y una vista en sección del objeto con burlete de soldadura de la figura 3, el funcionamiento de las etapas de cálculo de los tiempos de vuelo y trayectos especulares del proceso de la figura 2,
- 15 Figura 9: ilustra a través de una vista en sección del objeto con burlete de soldadura de la figura 3, el funcionamiento de las etapas de reconstrucción geométrica de superficie del proceso de la figura 2,
- Figura 10: ilustra a través de una vista en sección del objeto con burlete de soldadura de la figura 3, una primera aplicación del proceso de la figura 2,
- 20 Figura 11: ilustra a través de una vista en sección del objeto con burlete de soldadura de la figura 3, una segunda aplicación del proceso de la figura 2,
- Figura 12: representa un segundo ejemplo de utilización de la sonda de la figura 1 para sondear un objeto compuesto radial,
- 25 Figuras 13 a 16: son B-scan obtenidos a partir de señales de medida del objeto compuesto de la figura 12, para, respectivamente, una primera, una segunda, una tercera y una cuarta iteración de un bucle de etapas del proceso de la figura 2, y
- Figura 17: ilustra a través de un B-scan y de una vista en sección del objeto compuesto de la figura 12, una tercera aplicación del proceso de la figura 2.
- 30 En referencia a la figura 1, un dispositivo de sondeo 100 de un objeto 102 según una forma de realización de la invención comprende un brazo articulado 104, una sonda ultrasónica 106 fijada al brazo articulado 104 y medios de mando 108 del brazo articulado diseñados para controlar el brazo articulado 104 de forma que éste desplace la sonda 106 con respecto al objeto 102.
- El objeto 102 es, por ejemplo, una pieza mecánica que se desea examinar mediante un control no destructivo o bien, en un contexto médico, una parte del cuerpo humano que se quiere estudiar de forma no invasiva.
- 35 En la forma de realización de la figura 1, el objeto 102 está sumergido en un líquido, por ejemplo agua 110, y la sonda 106 se mantiene a distancia del objeto 102 para que el agua 110 los separe.
- La sonda 106 comprende en primer lugar una caja 112, esto es un elemento con una estructura indeformable que sirve de referencia, sujeta a la sonda 106.
- 40 La sonda 106 comprende además N transductores  $114_1, \dots, 114_N$  dispuestos linealmente en la caja 112 y sujetos a esta última. Los transductores  $114_1, \dots, 114_N$  están diseñados para emitir ondas ultrasónicas en dirección al objeto 102 como respuesta a señales de control identificadas por la referencia general C, según principales direcciones paralelas entre sí, indicadas por flechas de puntos en la figura 1, y en un plano principal que corresponde al de la figura.
- 45 Los transductores  $114_1, \dots, 114_N$  están además diseñados para detectar ecos de las ondas ultrasónicas que se reflejan sobre y en el objeto 102 y para producir señales de medida identificadas con la referencia general M y correspondientes a dichos ecos.
- El dispositivo de sondeo 100 comprende además un circuito electrónico 116 de control de los transductores  $114_1, \dots, 114_N$  de la sonda 106 y de procesamiento de las señales de medida M. El circuito electrónico 116

está conectado a la sonda 106 para transmitir las señales de control C y para recibir las señales de medida M. El circuito electrónico 116 es, por ejemplo, el de un ordenador. El circuito electrónico 116 presenta una unidad central de procesamiento 118, tal como un microprocesador, diseñada para emitir hacia la sonda 106 las señales de control C y para recibir de la sonda 106 las señales de medida M y una memoria 120 donde está grabado un programa de ordenador 122.

El programa de ordenador 122 comprende un bucle de instrucciones 124 a 138 que puede ser ejecutado una o varias veces. A continuación de la descripción, un rango de iteración  $p$  será utilizado para distinguir las diferentes iteraciones del bucle de instrucciones 124 a 138. La ejecución inicial del bucle corresponde a  $p$  igual a cero (primera iteración), mientras que cada repetición del bucle corresponde al valor de  $p$ :  $p$  es igual a uno para la primera repetición (es decir la segunda iteración), a dos para la segunda repetición (es decir la tercera iteración), etc.

El programa de ordenador 122 comprende en primer lugar instrucciones 124 diseñadas para determinar los

retardos de emisión  $L^p = \{L_1^p, \dots, L_N^p\}$ , donde  $L_n^p$  es el retardo de emisión a aplicar al transductor

114<sub>n</sub>, a partir de los retardos iniciales  $E^0 = \{E_1^0, \dots, E_N^0\}$  y, en su caso, retardos de emisión

complementarios  $E^1 = \{E_1^1, \dots, E_N^1\}, \dots, E^p = \{E_1^p, \dots, E_N^p\}$  que se determinarán según las instrucciones 136 descritas más adelante. En la forma de realización descrita, los retardos de emisión  $L^p$  se determinan sumando los retardos iniciales  $E^0$  y los retardos de emisión complementarios  $E^1, \dots, E^p$ :  $L^p = E^0 + E^1 + \dots + E^p$ . En la primera ejecución de las instrucciones 124, es decir cuando  $p$

es igual a cero, los retardos de emisión  $L^0$  son iguales a los retardos iniciales  $E^0$ :  $L^0 = E^0$ . Los retardos iniciales  $E^0$  están predefinidos en el programa de ordenador 122. Se trata por ejemplo de retardos nulos (ningún retardo entre los transductores 114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub>), en particular cuando ninguna información, ni aproximada, es conocida de la geometría del objeto 102. Como variante, los retardos iniciales  $E^0$  pueden ser no nulos, y engendran por ejemplo un frente de onda parcialmente adaptado a la geometría del objeto 102 en una primera aproximación. Esta variante se utiliza por ejemplo cuando la geometría del objeto 102 es ya conocida, al menos en parte.

El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 126 diseñadas para controlar los transductores 114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub> con el fin de que emitan hacia el objeto 102 ondas ultrasónicas con retardos de emisión  $L^p$  unas con respecto a las otras. Para ello, las instrucciones 126 están diseñadas para transmitir en

la  $p$ -ésima iteración señales de control C llamadas  $C^p = \{C_1^p, \dots, C_N^p\}$  a los transductores

114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub>, donde  $C_n^p$  es la instrucción transmitida al transductor 114<sub>n</sub> para presentar un retardo de emisión  $L_n^p$ . Estas señales de control  $C^p$  están diseñadas para que los transductores 114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub> emitan

en cada caso un pulso de onda ultrasónica de tiempo de pseudo-período T, donde los pulsos están desfasados en el tiempo unos con respecto a otros los retardos de emisión  $L^p$ . Los retardos de emisión  $L^p$  tienen como objetivo compensar las diferencias entre las distancias que separan cada transductor del objeto 102 para el trayecto de ida, de forma que las ondas ultrasónicas emitidas por los transductores 114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub> alcancen al objeto 102 en el mismo momento.

El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 128 diseñadas para recibir a la  $p$ -ésima

iteración, desde los transductores, las señales de medida M llamadas  $M^p = \{M_1^p, \dots, M_N^p\}$ ,

donde  $M_n^p$  es la señal de medida emitida por el transductor 114<sub>n</sub>, que mide en particular los ecos debidos a las reflexiones de las ondas ultrasónicas en el objeto 102. Las instrucciones 128 están diseñadas además para registrar las señales de medida  $M^p$ . En la forma de realización descrita, las instrucciones 128 están diseñadas para registrar la señal de medida  $M_n^p$  de cada transductor 114<sub>n</sub> en una puerta temporal de

duración predeterminada que comienza, por ejemplo, cuando se emite la señal de control  $C_n^p$  de dicho transductor 114<sub>n</sub>. Los registros de las señales de medida  $M^p$  se denominan

$EN^p = \{EN_1^p, \dots, EN_N^p\}$ , donde  $EN_n^p$  es el registro de la señal  $E_n^p$  del transductor 114<sub>n</sub>. Las señales de control  $C^p$  incluyen los retardos de emisión  $L^p$ , los registros  $EN^p$  de las señales de medida  $M^p$  integran también dichos retardos de emisión.

El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 130 diseñadas para determinar los desfases

de recepción  $R^p = \{R_1^p, \dots, R_N^p\}$  de los registros  $EN^p$  a partir de los retardos de emisión  $L^p$ ,  $R_n^p$

, siendo el desfase de recepción del registro  $EN_n^p$ . En la forma de realización descrita, los desfases de

recepción  $R^p$  se determinan mediante la fórmula siguiente:  $R_n^p = \max(L_1^p, \dots, L_N^p) - L_n^p$ . Los

- 5 desfases de recepción  $R^p$  tienen como objeto compensar las diferencias entre las distancias que separan a cada transductor del objeto para el trayecto de vuelta, de forma que las ondas ultrasónicas, que se supone que deben reflejarse en el mismo momento en la superficie del objeto 102 gracias a los retardos de emisión  $L^p$ , estén sincronizadas y, por tanto, en el registro se considera que han alcanzado al mismo tiempo los transductores 114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub>.

- 10 El programa de ordenador 122 comprende entonces instrucciones 132 diseñadas para desfasar los registros  $EN^p$  de las señales de medida  $M^p$  en función de los desfases de recepción  $R^p$ . Los registros así desfasados

se denominan  $\underline{EN}^p = \{\underline{EN}_1^p, \dots, \underline{EN}_N^p\}$ , donde  $\underline{EN}_n^p$  es el registro desfasado de la señal  $M_n^p$  del transductor 114<sub>n</sub>.

El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 134 diseñadas para determinar los tiempos

- 15 de vuelo de ida y vuelta  $t^p = \{t_1^p, \dots, t_N^p\}$ , donde  $t_n^p$  es el tiempo de vuelo de ida y vuelta determinado

a partir del registro desfasado  $\underline{EN}_n^p$  correspondiente al transductor 114<sub>n</sub>. Así, los tiempos de vuelo de ida y vuelta  $t^p$  tienen en cuenta retardos de emisión  $L^p$  y desfases de recepción  $R^p$ . En la forma de realización descrita, el tiempo de vuelo ida y vuelta  $t_n^p$  para cada transductor 114<sub>n</sub> se determina detectando, por ejemplo,

el máximo de la envolvente de la señal de medida correspondiente  $M_n^p$  registrada en el registro desfasado

- 20  $\underline{EN}_n^p$ .

El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 136 diseñadas para determinar nuevos retardos de emisión complementarios  $E^{p+1}$  a partir de los tiempos de vuelo de ida y vuelta  $t^p$ . En la forma de realización descrita, los retardos de emisión complementarios  $E^{p+1}$  se determinan mediante la fórmula siguiente:

$$E_n^{p+1} = \frac{1}{2} [\max(t_1^p, \dots, t_N^p) - t_n^p].$$

25

El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 138 diseñadas para evaluar un test de parada con el fin de salir del bucle de instrucciones 124 a 138 cuando el test de parada se verifica o para seguir con una nueva iteración en caso contrario. En este último caso, las instrucciones 138 están diseñadas para volver a las instrucciones 124 y provocar una nueva iteración del bucle de instrucciones 124 a 138 con los nuevos retardos de emisión complementarios  $E^{p+1}$ , de modo que el conjunto de los retardos de emisión complementarios comprende los  $p+1$  retardos de emisión complementarios  $E^1, \dots, E^{p+1}$ . En la presente descripción, es en ese momento cuando el índice  $p$  se incrementa en una unidad, de modo que el conjunto de los retardos de emisión complementarios se designa en ese momento  $E^1, \dots, E^p$ , según la descripción de las instrucciones 124. En la forma de realización descrita, el test de parada consiste en determinar si se

- 35 verifica la desigualdad siguiente:  $\max(E_1^p, \dots, E_N^p) \leq \frac{\lambda}{4v}$  donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el

agua a la frecuencia central  $f$  de funcionamiento de los transductores ( $\lambda = v/f$ ), siendo  $v$  la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en este mismo medio, y donde  $E^p$  representa los últimos retardos de emisión complementarios determinados por las instrucciones 136 (donde eran señalados como  $E^{p+1}$ ). Concretamente, dicho test significa que, si la diferencia máxima entre los tiempos de vuelo de ida y vuelta  $t^p$

- 40 determinados por las instrucciones 134 es inferior a  $\frac{\lambda}{4v}$ , puede considerarse en una primera aproximación

que estos tiempos de vuelo son iguales y que la superficie del objeto 102 ha sido realmente alcanzada simultáneamente por todas las ondas emitidas. Como variante, las instrucciones 138 pueden ser diseñadas

para salir del bucle de instrucciones 124 a 138 tras un número predeterminado de ejecuciones del bucle, por ejemplo cuatro o cinco, es decir para  $p$  igual a tres o cuatro.

- Si el resultado del test de parada ordena salir del bucle de instrucciones 124 a 138, entonces las instrucciones 138 están diseñadas para pasar a las instrucciones 140 de análisis de los últimos tiempos de vuelo de ida y vuelta calculados por las instrucciones 134. Estos últimos tiempos de vuelo ida y vuelta se denominan  $t^f$ .

El programa de ordenador 122 comprende entonces estas instrucciones 140 diseñadas en primer lugar para determinar un tiempo de vuelo ida y vuelta  $Tc$  común a todos los transductores, por ejemplo definido por

$$Tc = \left\langle t_n^f \right\rangle_{1 \leq n \leq N}, \text{ donde } \langle \rangle \text{ designa la operación media. } Tc \text{ es el valor de primera aproximación de}$$

- los tiempos de vuelo de ida y vuelta  $t^f$  considerados como todos iguales a la salida del bucle de instrucciones 124 a 138.

Convenientemente, la invención aprovecha el hecho de que este valor común de tiempo de vuelo ida y vuelta  $Tc$  para el conjunto de los transductores integra finalmente los últimos retardos de emisión aplicados a los transductores, designados  $L^f$ , y los últimos desfases de recepción aplicados a los registros, designados  $R^f$ .

- Conforme al cálculo aplicado para los desfases de recepción, es posible volver a encontrar el tiempo de vuelo especular real denominado  $t_n$  entre cada transductor 114<sub>n</sub> y la superficie del objeto 102 gracias a la relación siguiente:

$$\forall n, \quad Tc = L_n^f + t_n - R_n^f.$$

- Se recuerda que el tiempo de vuelo especular  $t_n$  entre el centro del transductor 114<sub>n</sub> y la superficie del objeto 102 es el tiempo mínimo empleado por una señal emitida por este transductor para volver en forma de eco después de una reflexión contra la superficie del objeto. Éste representa entonces la distancia más corta que separa el transductor 114<sub>n</sub> de la superficie del objeto 102, es decir el segmento de recta normal a dicha superficie que se une al transductor 114<sub>n</sub>; dicho segmento se denomina en lo que sigue trayecto especular.

- Las instrucciones 140 están también diseñadas para determinar, para cada transductor 114<sub>n</sub>, el tiempo de vuelo especular  $t_n$  asociado según el cálculo siguiente:

$$t_n = Tc - L_n^f + R_n^f.$$

Como variante, los últimos desfases de recepción  $R^f$  podrían no ser aplicados a los últimos registros, lo que

simplificaría la ecuación anterior, que sería entonces:  $t_n = Tc - L_n^f$ .

- Finalmente, las instrucciones 140 están diseñadas para determinar, para cada transductor 114<sub>n</sub>, la distancia  $d_n$  que lo separa de la superficie del objeto 102, según la relación siguiente

$$d_n = \frac{1}{2} v \cdot t_n,$$

donde  $v$  es la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el agua.

- El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 142 diseñadas para calcular, en un punto de referencia (O, x, y) relacionado con la caja 112 de la sonda y que define su plano de control, las coordenadas (x<sub>n</sub>, y<sub>n</sub>) de los puntos P<sub>n</sub> de la superficie del objeto 102 que se encuentran en los extremos de los trayectos especulares asociados a los transductores 114<sub>n</sub>. Estos puntos P<sub>n</sub> están definidos como formando parte de la superficie del objeto 102 (más precisamente de su intersección con el plano de control) y de los círculos (como intersecciones de esferas con el plano de control) respectivamente centrados en los transductores y de radios  $d_n$ ; en otros términos, la superficie del objeto 102 tal como está representada en el plano de control de la sonda se define naturalmente como una curva tangencial al conjunto de los círculos respectivos de centros C<sub>n</sub> (es decir los centros puntuales de cada transductor 114<sub>n</sub>) y de radios  $d_n$  o, dicho de otro modo, como la envolvente de dichos círculos. Un método de resolución de este problema puramente geométrico se describe por ejemplo en el documento de F. Assouline titulado "Migration profondeur et démigration pour l'analyse de vitesse de migration 3D", que es tesis presentada en la Universidad de Pau y de los Países del Adour, Escuela doctoral de ciencias exactas y de sus aplicaciones, el 4 de julio de 2001. Más particularmente en el capítulo 1.3.4 titulado "Migration 3D de Kirchhoff par déport commun", la determinación de una envolvente de isócronos viene dada por un sistema de ecuaciones 1.72 que puede simplificarse caso por caso según el modo de realización elegido.



Así, por ejemplo en el caso bidimensional de una sonda donde los N transductores están situados linealmente en la caja 112, las coordenadas de sus centros pueden expresarse bajo la forma  $(c_n, 0)$  en el sistema de referencia  $(O, x, y)$  y el sistema de ecuación 1.72 aplicado a los puntos  $P_n$  por las instrucciones 142 se simplifica del modo siguiente:

$$\forall n, \quad 1 \leq n \leq N-1, \quad \begin{cases} x_n = c_n - d_n \cdot d_n' \\ y_n = d_n \sqrt{1 - d_n'^2} \end{cases}, \quad \text{donde} \quad d_n' = \frac{d_{n+1} - d_n}{c_{n+1} - c_n}.$$

Se señala que con una sonda con N transductores, la superficie a detectar está descrita por N-1 puntos  $P_n$  al no permitir, el cálculo de las derivadas discretas  $d_n$ , conocer el último punto de la superficie.

El programa de ordenador 122 comprende además instrucciones 144 diseñadas para reconstituir geométricamente la superficie a detectar mediante interpolación lineal. Dicha aproximación es válida para objetos que no muestran variaciones superficiales demasiado bruscas entre dos transductores sucesivos de la sonda, lo que es así en la mayoría de las aplicaciones donde las superficies controladas son lentamente variables. Como variante, la interpolación lineal puede reemplazarse por una interpolación polinomial. En el caso de una sonda con N transductores colocados linealmente, se obtiene así un perfil de la superficie del objeto 102 en el plano de control de la sonda.

Sin embargo, las instrucciones 142 y 144 pueden adaptarse fácilmente a una sonda matricial donde los transductores están colocados bidimensionalmente en una matriz. En este caso, el principio de reconstrucción geométrica de la superficie del objeto 102 consiste en general en calcular la superficie tangencial a una familia de esferas de radios  $d_i$  y cuyos centros  $C_i$  son los centros de los transductores de la matriz.

En referencia a la figura 2, se describe ahora un proceso 200 de determinación de una superficie del objeto 102 llevado a cabo por el dispositivo 100 de la figura 1.

Durante una etapa 202, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 124 determina los

retardos de emisión  $L^p = \{L_1^p, \dots, L_N^p\}$  a partir de los retardos iniciales  $E^0$  y, en su caso, de los retardos de emisión complementarios  $E^1, \dots, E^p$  que habrán sido determinados en la etapa 222, descrita más adelante.

Durante las etapas 204<sub>1</sub> a 204<sub>N</sub>, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 126 controla cada transductor 114<sub>n</sub> para que emita ondas ultrasónicas hacia el objeto 102, donde las ondas ultrasónicas emitidas por los transductores 114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub> tienen los retardos de emisión  $L^p$  unas con respecto a otras. Para ello, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 126 transmite cada señal de mando  $C_n^p$  al transductor 114<sub>n</sub> correspondiente, incluyendo las señales de mando  $C^p$  los retardos de emisión  $L^p$ .

Durante las etapas 206<sub>1</sub> a 206<sub>N</sub>, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 128 inicia, después de la transmisión de cada señal de mando  $C_n^p$  hacia el transductor 114<sub>n</sub> correspondiente, el registro de la señal de medición  $M_n^p$  proporcionada por este transductor 114<sub>n</sub>.

Durante las etapas 208<sub>1</sub> a 208<sub>N</sub>, cada transductor 114<sub>1</sub>, ..., 114<sub>N</sub> emite, después de recibir su señal de control, un pulso de onda ultrasónica de frecuencia central  $f$ . De este modo, los pulsos están desfasados en el tiempo unos con respecto a otros los retardos de emisión  $L^p$ .

En las etapas 210<sub>1</sub> a 210<sub>N</sub>, cada transductor 114<sub>n</sub> recibe los ecos de las ondas ultrasónicas reflejadas sobre y en el objeto 102.

En las etapas 212<sub>1</sub> a 212<sub>N</sub>, cada transductor 114<sub>n</sub> produce su señal de medida, que mide en particular los ecos de las ondas ultrasónicas en la superficie del objeto 102. La unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 128 recibe esta señal  $M_n^p$  y la registra en el registro  $EN_n^p$ .

En las etapas 214<sub>1</sub> a 214<sub>N</sub>, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 128 detiene el registro  $EN_n^p$  de la señal  $M_n^p$  del transductor 114<sub>n</sub>.

Durante una etapa 216, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 130 determina los desfases de recepción  $R^p$  a partir de los retardos de emisión  $L^p$ .

- 5 En una etapa 218, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 132 desfasa los registros  $EN^p$  de las señales de medida  $M^p$  en función de los desfases de recepción  $R^p$  para obtener los registros desfasados  $EN^p$ .

En una etapa 220, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 134 determina los tiempos de vuelo de ida y vuelta  $t^p = \{t_1^p, \dots, t_N^p\}$  entre los transductores  $114_1 \dots 114_N$  y el objeto 102, considerando los retardos de emisión  $L^p$  y los desfases de recepción  $R^p$ , a partir de los registros desfasados  $EN^p$ .

- 10 En una etapa 222, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 136 determina los nuevos retardos de emisión complementarios  $E^{p+1}$  a partir de los tiempos de vuelo de ida y vuelta  $t^p$ .

Así, se remarca que las etapas 216 a 222 permiten determinar los retardos de emisión complementarios  $E^{p+1}$  a partir de las señales de medida  $M^p$ .

- 15 En el transcurso de una etapa 224, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 138 determina la parada o la continuación del bucle de instrucciones 124 a 138 y, en este último caso, incrementa  $p$  en una unidad antes de volver a la etapa 202.

Si el test de parada se verifica, se pasa a una etapa 226 durante la cual la unidad de procesamiento 118 ejecuta las instrucciones 140 para determinar el tiempo de vuelo especular  $t_n$  asociado a cada transductor  $114_n$ .

- 20 En una etapa 228 siguiente, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 140 determina a partir de cada tiempo de vuelo especular  $t_n$ , cada distancia  $d_n$  que separa cada transductor  $114_n$  de la superficie del objeto 102.

A continuación, en una etapa 230, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 142 determina  $N-1$  puntos  $P_1, \dots, P_{N-1}$  de la superficie del objeto 102.

- 25 Finalmente, en una etapa 232, la unidad de procesamiento 118 que ejecuta las instrucciones 144 reconstruye geoméricamente la superficie del objeto 102 por interpolación, en particular por interpolación lineal.

- 30 Las etapas 226 a 232 realizan procesamientos simples, por tanto rápidos, que no añaden complejidad significativa al conjunto del proceso de la figura 2. De este modo, la invención proporciona un proceso en "tiempo real" de detección de la superficie incluso compleja de un objeto cuyo estado superficial no se conoce previamente. Se puede entonces calificar dicho proceso de adaptación como permitiendo una imagen en tiempo real.

- 35 El proceso de la figura 2, compatible con un funcionamiento de alto ritmo, se implementa para cada posición del desplazamiento de la sonda 106 con respecto al objeto 102. En caso de que el objeto presente pocas variaciones geométricas a lo largo del desplazamiento, los retardos de emisión iniciales  $E^0$  en una posición dada se consideran ventajosamente iguales a los últimos retardos de emisión  $L^p$  determinados en una posición anterior, principalmente la posición inmediatamente anterior. Eso permite aumentar la velocidad de inspección de piezas con superficies muy extensas disminuyendo la cantidad de disparos en cada posición.

En referencia a las figuras 3 a 9, se detalla un primer ejemplo de utilización del proceso de determinación de la superficie de la figura 2.

- 40 En referencia a la figura 3, en el ejemplo descrito, el objeto 102 es una pieza metálica cuya geometría compleja es representativa de un burlete de soldadura 302 que la sonda 106 del dispositivo de sondeo 100 va a sondear. La sonda 106 comprende por ejemplo  $N = 128$  transductores.

Para sondear el burlete de soldadura 302, se lleva a cabo el proceso de la figura 2.

- 45 En una primera ejecución del bucle de etapas, es decir cuando  $p$  es igual a cero (primera iteración), se emiten ondas ultrasónicas en las etapas 208<sub>1</sub> a 208<sub>N</sub> por los transductores, con retardos de emisión  $L^0$  iguales a los retardos iniciales  $E^0$ :  $L^0 = E^0$ , nulos en el ejemplo descrito.

A continuación, en la etapa 218, se obtienen los registros desfasados  $EN^p$ . En referencia a la figura 4, la amplitud de la envolvente de las señales desfasadas  $EN^p$  se determina en la etapa 220. En la figura 4, en la que el eje vertical corresponde al tiempo, se muestra en el eje horizontal a los transductores y la amplitud de

la envolvente a nivel del gris de los puntos. Esta representación es conocida, tal como se ha indicado anteriormente, con el nombre de "B-scan". En esta representación B-scan, la distancia de ida y vuelta  $t_n^0$  para cada transductor  $114_n$  se determina como la distancia que separa el origen de los tiempos del máximo de la amplitud de la envolvente, es decir del punto más oscuro en la línea vertical correspondiente al transductor  $114_n$ .

Como variante, se señala que la representación B-scan puede modificarse aplicando un tratamiento de media deslizante a las señales de medida registradas en los registros desfasados  $EN^p$ .

Los retardos de emisión complementarios  $E^1$  se determinan entonces en la etapa 222 y la continuación de la ejecución del programa se decide en la etapa 224, de modo que se realiza una primera repetición (segunda iteración) de las etapas (p se incrementa a 1).

La figura 5 representa el B-scan obtenido en la etapa 220 de esta primera repetición (o segunda iteración,  $p=1$ ), a partir de los retardos de emisión  $L^1 = E^0 + E^1$ . Los retardos de emisión complementarios, calculados a partir de los tiempos de trayecto de ida y vuelta, permiten obtener una superficie de objeto sondeado horizontal que indicaría que las ondas ultrasónicas de todos los transductores alcanzan en el mismo momento el burlete de soldadura 302. No obstante, se señala que éste no es el caso y que la línea de superficie correspondiente al burlete de soldadura 302 está siempre un poco abombada.

En efecto, los inventores determinaron que, para piezas de geometría compleja, la primera iteración y su repetición hasta la etapa 220 no son suficientes para corregir las diferencias de geometría y los fenómenos de superposición de ondas que aparecen en una misma señal de medida. Efectivamente, cada transductor detecta un eco producto de la interferencia entre el eco resultante de su propia emisión de ondas ultrasónicas y los ecos resultantes de las ondas ultrasónicas emitidas por los transductores cercanos. No obstante, se puede adaptar el aparato de sondeo 100 a geometrías muy complejas, tales como el burlete de soldadura 302, iterando varias veces completamente las etapas del proceso 200 de la figura 2.

Así, la figura 6 representa el B-scan obtenido en la etapa 220 de la segunda repetición (o tercera iteración  $p=2$ ) a partir de los retardos de emisión  $L^2 = E^0 + E^1 + E^2$ , mientras que la figura 7 representa el B-scan obtenido en la etapa 220 de la tercera repetición (o cuarta iteración,  $p=3$ ) a partir de los retardos de emisión  $L^3 = E^0 + E^1 + E^2 + E^3$ . Se señala que la superficie del objeto sondeado es prácticamente horizontal en esta última figura, lo que indica que el aparato de sondeo 100 está adaptado a la geometría del objeto 102, es decir que el frente de onda ultrasónica formado por el conjunto de las ondas generadas por todos los transductores  $114_1 \dots 114_N$  tiene la misma curvatura que la superficie del burlete de soldadura 302. Durante esta última etapa, todos los tiempos de vuelo de ida y vuelta pueden ser considerados iguales a un mismo valor  $T_c$ .

Las figuras 8A, 8B y 8C ilustran el desarrollo de las etapas 226 y 228 en ejecución de las instrucciones 140. En la figura 8A están representados los últimos retardos de emisión  $L^f$  aplicados a los N transductores y los últimos desfases de recepción  $R^f$  aplicados a los registros. En la figura 8B se muestran los tiempos de vuelo especulares resultantes, calculados en la etapa 226, para un valor  $T_c$  de 20  $\mu s$ . Finalmente, en la figura 8C están ilustradas las distancias  $d_n$  que separan cada transductor  $114_n$  de la superficie del objeto 102, es decir las longitudes de los trayectos especulares tal como se calculan en la etapa 228.

La figura 9 ilustra el resultado de las etapas 230 y 232 en ejecución de las instrucciones 142 y 144. La superficie del objeto 102 se ha reconstruido geoméricamente por interpolación lineal a partir de los puntos  $P_n$ , determinados a partir de las posiciones  $c_n$  de los transductores  $114_n$  y de las distancias  $d_n$ .

Retomando el ejemplo de las figuras 3 a 9, donde el objeto 102 es una pieza metálica cuya geometría compleja es representativa de un burlete de soldadura 302, se presentan e ilustran dos aplicaciones diferentes en las figuras 10 y 11.

La primera aplicación del proceso anteriormente detallado es la imagen ecográfica de piezas metálicas en tiempo real por focalización en diferentes puntos. Esta aplicación se ilustra en la figura 10 con una imagen de tipo S-scan obtenida focalizando según diferentes ángulos y a profundidad constante. Esta tecnología se basa en el control en cada momento de la profundidad y del ángulo de focalización del haz ultrasónico por la definición de un conjunto de leyes de retardos (una ley de retardos para cada punto de focalización) que evoluciona en el tiempo y se aplica al conjunto de los transductores de la sonda. Sin embargo, en el estado de la técnica, esta tecnología necesita un perfecto conocimiento de la geometría del objeto sondeado para poder adaptar las leyes de retardos en consecuencia. Así, para un objeto con geometría variable, el control necesitaría reconstruir la superficie del objeto para cada posición de la sonda con el fin de adaptar las leyes de retardos a la geometría encontrada y controlar un haz constante a lo largo de todo el desplazamiento y cualquiera que sea el estado superficial del objeto sondeado.

Una solución aportada mediante la aplicación del proceso de la figura 2 se ilustra en la figura 10. Tal como se observa, después de reconstruir la superficie S del objeto 102 gracias a la aplicación del proceso de la figura 2, se calcula un juego de leyes de retardos LR en función de dicha superficie reconstruida para focalizar según diferentes ángulos y a profundidad constante. Se obtiene un S-scan que permite principalmente detectar eventuales defectos D. Así, la utilización de dicho proceso permite reconstruir la superficie del objeto en cada posición de la sonda y adaptar por tanto las leyes de retardos para controlar una imagen de tipo S-scan en tiempo real durante su desplazamiento.

La tecnología clásica utilizada para obtener una imagen a partir de un juego de leyes de retardos adaptadas gracias a la aplicación del proceso de detección según la invención es por ejemplo una de las descritas en los documentos siguientes:

- artículo de A.Lamarrey col., titulado "Dynamic focusing of phased arrays for nondestructive testing; characterization and application", publicado en el e-journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics, nº9, vol. 4, septiembre 1999,
- artículo de J.Liangy col., titulado "Ultrasonic Inspection of thick parts with phased array dynamic focusing", publicado después de la 10<sup>o</sup> European Conference on Non-Destructive Testing, 7-11 de junio 2010, Moscú,
- artículo de C.Holmesy col., titulado "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation", publicado en NDT & E International, vol. 38, nº 2, páginas 701-711, diciembre 2005, y
- artículo de A.Fidahoussen y col., titulado "Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data", publicado en 36<sup>th</sup> Annual Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation, vol.29, páginas 847-854, 2010.

La segunda aplicación del proceso anteriormente detallado, ilustrada en la figura 11, se refiere a una familia de aplicaciones según las cuales las imágenes ecográficas se obtienen aplicando leyes de retardos que permiten focalizar en la pieza después de la reflexión en el fondo. Esto exige un conocimiento previo de la geometría de la superficie, pero también del fondo del objeto a inspeccionar, por ejemplo tal como se menciona en el artículo de A.Bazulin y col. titulado "Algorithms and software development for welds automated ultrasonic inspection basing on phased arrays", publicado después de la 10<sup>o</sup> European Conference on Non-Destructive Testing, 7-11 junio 2010, Moscú, o en el artículo de A.Fidahoussen y col. anteriormente nombrado. Si la sonda con transductores múltiples está destinada a estar en contacto con el objeto sondeado 102, únicamente la superficie del fondo del objeto 102 necesita ser reconstruida. Con una aplicación estricta del proceso de la figura 2, dicha superficie del fondo puede ser reconstruida geoméricamente en relación a la superficie en contacto con los transductores, siendo la única diferencia es que la velocidad de las ondas ultrasónicas, en contacto, provocan que estas ondas longitudinales se propaguen en el material del objeto sondeado.

La figura 11 ilustra en particular el caso donde la sonda con transductores múltiples está en contacto con el objeto utilizando la tecnología descrita en la patente francesa publicada bajo el número FR 2 786 651. En este documento, los transductores están unidos en forma móvil a la caja para poder adoptar la geometría de la superficie del objeto a sondear. Se prevén entonces medios para determinar la posición de los transductores y con ello la geometría de la superficie del objeto. La aplicación estricta del proceso de la figura 2 permite entonces, a partir del conocimiento de la superficie, deducir la geometría del fondo de la pieza.

En referencia a las figuras 12 a 16, se detalla ahora un segundo ejemplo de utilización del proceso de determinación de superficie de la figura 2. Dicho segundo ejemplo se refiere a la inspección de piezas compuestas.

En referencia a la figura 12, en el ejemplo descrito, el objeto referenciado con 102' es una pieza compuesta radial 1202 con un ángulo elevado que la sonda 106 del dispositivo de sondeo 100 va a sondear. La sonda 106 comprende por ejemplo N = 49 transductores.

Para sondear el compuesto radial 1202, se lleva a cabo el proceso de la figura 2.

En una primera ejecución del bucle de etapas, es decir cuando p es igual a cero (primera iteración), se emiten ondas ultrasónicas en las etapas 208<sub>1</sub> a 208<sub>N</sub> por los transductores con retardos de emisión  $L^0$  iguales a los retardos iniciales  $E^0$ :  $L^0 = E^0$ , nulos en el ejemplo descrito.

A continuación, se obtienen unos registros desfasados  $EN^p$  en la etapa 218. En referencia a la figura 13, la amplitud de la envolvente de las señales desfasadas  $EN^p$  se determina en la etapa 220 y se reproduce en el B-scan correspondiente. Se señala la aparición de una línea de superficie oscura LF, correspondiente al eco de la superficie del compuesto radial 1202, seguida de un ruido considerable de estructura BF que no permite en ningún caso revelar la presencia de un eventual defecto en el objeto 102'.

Los retardos de emisión complementarios  $E^1$  se determinan entonces en la etapa 222 y la continuación de la ejecución del programa se decide en la etapa 224 de modo que se realiza una primera repetición (segunda iteración) de las etapas ( $p$  se incrementa a 1).

5 La figura 14 representa el B-scan obtenido en la etapa 220 de esta primera repetición (o segunda iteración,  $p=1$ ), a partir de los retardos de emisión  $L^1 = E^0 + E^1$ . En este caso también, la línea de superficie LF del objeto sondeado, correspondiente a la superficie del compuesto radial 1202, está siempre un poco abombada.

La figura 15 representa el B-scan obtenido en la etapa 220 de la segunda repetición (o tercera iteración,  $p=2$ ), a partir de los retardos de emisión  $L^2 = E^0 + E^1 + E^2$ , mientras que la figura 16 representa el B-scan obtenido en la etapa 220 de la tercera repetición (o cuarta iteración,  $p=3$ ), a partir de los retardos de emisión  $L^3 = E^0 + E^1 + E^2 + E^3$ .

15 Se señala que la línea oscura LF es prácticamente horizontal en esta última figura, lo que indica que el frente de onda ultrasónica formado por el conjunto de las ondas generadas por todos los transductores 114<sub>1</sub>...114<sub>N</sub> tiene la misma curvatura que la superficie del compuesto radial 1202. Además, el ruido interno ha desaparecido, dejando aparecer la estructura real del objeto 102', en particular una línea clara LC que indica el fondo del objeto. De este modo, todo defecto en el objeto 102' se hace aparente gracias a una repetición múltiple del bucle de etapas anteriormente descrito. En particular, los defectos de tipo deslaminado se detectan mejor.

La ejecución de las etapas 226 a 232 en el resultado obtenido en la figura 16 permite entonces reconstruir geométricamente la superficie curva del objeto 102'.

20 Retomando el ejemplo de las figuras 12 a 16, en el cual el objeto 102' es una pieza compuesta de rayón 1202 con un ángulo elevado, se considera y se ilustra una tercera aplicación en la figura 17.

25 Esta tercera aplicación consiste en reconstruir una imagen ecográfica a partir del B-scan de la figura 16. Este B-scan está representado en la parte izquierda de la figura 17 con un defecto D detectado en el objeto 102'. La parte derecha es una imagen ecográfica donde los píxeles del B-scan de la izquierda se reposicionan en el punto de referencia (O, x, y) gracias al conocimiento de la geometría de la superficie detectada y por comparación con su forma lineal en el B-scan. Mediante dicha transformación, no solo se detecta el defecto D, sino que también puede ser localizado y medido con precisión en la imagen ecográfica reconstruida.

Además, por desplazamiento de la sonda a lo largo del objeto, varias imágenes ecográficas pueden ser reconstruidas y concatenadas en una sola imagen completa del objeto.

30 Es claro que un proceso y un dispositivo tales como los descritos anteriormente permiten reconstruir con precisión la geometría bidimensional o tridimensional de una superficie de objeto detectada por ecografía; dicha reconstitución detallada abre la vía para mejorar múltiples aplicaciones.

Se señala además que el proceso descrito anteriormente permite una detección en tiempo real y con un nivel de calidad elevado.

35 Se señala por otra parte que la invención no se limita a las formas de realización descritas anteriormente. En efecto, para el experto en la materia surgirán diversas modificaciones que pueden ser aportadas a las formas de realización descritas anteriormente según las enseñanzas que acaban de ser divulgadas.

En particular, las instrucciones de programa de ordenador podrían ser reemplazadas por circuitos electrónicos dedicados a las funciones realizadas durante la ejecución de dichas instrucciones.

40 Además, el proceso según la invención puede llevarse a cabo con un desplazamiento mecánico de la sonda o bien procediendo a un desplazamiento electrónico de una sub-apertura a lo largo de la apertura total del sensor donde están situados los transductores.

45 En las reivindicaciones siguientes, los términos utilizados no deben ser interpretados como una limitación de las reivindicaciones a las formas de realización expuestas en la presente descripción, sino que deben ser interpretados para incluir en ella todos los equivalentes que las reivindicaciones intentan cubrir mediante su formulación y cuya previsión está al alcance del experto en la materia al aplicar sus conocimientos generales a la implementación de la enseñanza que le acaba de ser divulgada.

# Reivindicaciones

1. Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) de un objeto (102; 102') por sondeo ecográfico mediante una sonda de ultrasonidos (106) provista con una pluralidad de transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>), que comprende las etapas siguientes:
  - 5 - controlar (204<sub>1</sub>,...,204<sub>N</sub>) los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) para que emitan hacia dicha superficie (S; LF) del objeto ondas ultrasónicas que tienen retardos de emisión iniciales (L<sup>0</sup>) unas con respecto a las otras,
  - ejecutar al menos una vez el bucle de etapas siguiente, de modo que se obtienen al menos una iteración un frente de ondas recibido simultáneamente en la superficie:
    - 10 • recibir (212<sub>1</sub>,...,212<sub>N</sub>) desde los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) señales de medida intermedias (M), que miden en particular ecos debidos a reflexiones de las ondas ultrasónicas en dicha superficie (S; LF) del objeto,
    - corregir (202) los retardos de emisión de los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) mediante las señales de medida intermedias (M) y controlar (204<sub>1</sub>,...,204<sub>N</sub>) los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) para que emitan hacia dicha superficie (S; LF) del objeto ondas ultrasónicas con los retardos de emisión corregidos (L<sup>p</sup>) unas con respecto a otras,
  - 15 - recibir (212<sub>1</sub>,...,212<sub>N</sub>) desde los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) señales de medida finales (M) que resultan de la reflexión de un frente de onda recibido simultáneamente en dicha superficie (S; LF) del objeto,
- 20 caracterizado porque comprende además las etapas siguientes:
  - determinar (226) tiempos de vuelo, denominados especulares, y correspondientes cada uno al tiempo mínimo empleado por una señal emitida por un transductor para volver a dicho transductor en forma de eco después de una reflexión contra la superficie del objeto, entre cada transductor (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) y dicha superficie (S; LF) del objeto a partir de las señales de medida finales (M) y de los retardos de emisión corregidos (L<sup>i</sup>), y
  - 25 - reconstruir geoméricamente (228, 230, 232) dicha superficie (S; LF) del objeto a partir de los tiempos de vuelo especulares determinados.
- 30 2. Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) según la reivindicación 1, caracterizado porque la determinación (226) de los tiempos de vuelo especulares comprende:
  - determinar un tiempo de vuelo de ida y vuelta común a todos los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) del frente de onda recibido simultáneamente en dicha superficie (S; LF) del objeto, y
  - calcular los tiempos de vuelo especulares a partir de este tiempo de vuelo de ida y vuelta de los retardos de emisión corregidos (L<sup>i</sup>) y los desfases de recepción (R<sup>i</sup>) aplicados a los transductores.
- 35 3. Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) según la reivindicación 1 o 2, donde la reconstrucción geométrica (228, 230, 232) de dicha superficie (S; LF) comprende:
  - determinar (228) las distancias (d<sub>n</sub>) que separan cada transductor (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) de dicha superficie (S; LF) a partir de los tiempos de vuelo especulares determinados,
  - 40 - calcular (230) coordenadas de puntos (P<sub>n</sub>) de dicha superficie (S; LF) en función de las coordenadas (c<sub>n</sub>) de los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) y de las distancias determinadas (d<sub>n</sub>), y
  - reconstruir geoméricamente (232) dicha superficie (S; LF) por interpolación entre estos puntos (P<sub>n</sub>).
- 45 4. Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) según la reivindicación 3, caracterizado porque el cálculo (230) de las coordenadas de puntos (P<sub>n</sub>) de dicha superficie (S; LF) está basado en la hipótesis de que dicha superficie es tangencial a un conjunto de esferas centradas respectivamente en los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) y de radios respectivos correspondientes a las distancias determinadas (d<sub>n</sub>).
- 50 5. Proceso de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) según la reivindicación 3 o 4, caracterizado porque los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) están colocados en forma lineal y la reconstrucción geométrica (228, 230, 232) de dicha superficie (S; LF) comprende reconstruir un perfil de esta superficie en el plano de control de la sonda.
- 55 6. Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) según la reivindicación 5, caracterizado porque los N transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) están dispuestos linealmente, expresándose las coordenadas de sus centros en forma (c<sub>n</sub>, 0) en un punto de referencia (O, x, y) unido a la sonda (106) y donde las coordenadas (x<sub>n</sub>, y<sub>n</sub>) de dichos puntos (P<sub>n</sub>) de dicha superficie (S; LF) se calculan según la relación siguiente:

$$\forall n, \quad 1 \leq n \leq N-1, \quad \begin{cases} x_n = c_n - d_n \cdot d_n' \\ y_n = d_n \sqrt{1 - d_n'^2} \end{cases}, \quad \text{donde} \quad d_n' = \frac{d_{n+1} - d_n}{c_{n+1} - c_n} \quad \text{y} \quad d_n \text{ designa la distancia que separa el } n\text{-ésimo transductor de dicha superficie.}$$

7. Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) según la reivindicación 3 o 4, caracterizado porque los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) están dispuestos bidimensionalmente en matriz y la reconstrucción geométrica (228, 230, 232) de dicha superficie (S; LF) comprende una reconstrucción tridimensional de dicha superficie.
8. Procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie (S; LF) según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 7, caracterizado porque la reconstrucción geométrica (228, 230, 232) de dicha superficie (S; LF) se lleva a cabo por interpolación lineal o bilineal entre dichos puntos (P<sub>n</sub>).
9. Programa de ordenador (122) descargable desde una red de comunicación y/o grabado en un soporte (120) legible por un ordenador y/o ejecutable por un procesador (118), caracterizado porque comprende instrucciones para la ejecución de las etapas de un procedimiento de reconstrucción de la geometría de una superficie de un objeto (102; 102') por sondeo ecográfico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, cuando dicho programa es ejecutado en un ordenador.
10. Dispositivo de sondeo ultrasónico que incluye una sonda (106) que comprende una caja (112) y una pluralidad de transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) ultrasónicos sujetos a la caja (112) y medios de control y de procesamiento (116) diseñados para:
  - controlar los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) para que emitan hacia dicha superficie (S; LF) del objeto ondas ultrasónicas con retardos de emisión iniciales (L<sup>0</sup>) unas con respecto a otras.
  - ejecutar al menos una vez el bucle de etapas siguiente para obtener tras al menos una iteración un frente de onda recibido simultáneamente en la superficie:
    - recibir desde los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) señales de medida intermedias (M), que miden en particular ecos debidos a reflexiones de las ondas ultrasónicas en dicha superficie (S; LF) del objeto,
    - corregir los retardos de emisión de los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) mediante las señales de medida intermedias (M) y controlar los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) para que emitan hacia dicha superficie (S; LF) del objeto ondas ultrasónicas con retardos de emisión corregidos (L<sup>p</sup>) unas con respecto a otras.
  - recibir desde los transductores (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) señales de medida finales (M) que resultan de la reflexión de un frente de onda recibido simultáneamente en dicha superficie (S; LF) del objeto,
 caracterizado porque los medios de control y de procesamiento (116) comprenden además:
  - medios de determinación de tiempos de vuelo, denominados especulares, y correspondientes cada uno al tiempo mínimo empleado por una señal emitida por un transductor para volver a dicho transductor en forma de eco después de una reflexión contra la superficie del objeto, entre cada transductor (114<sub>1</sub>,...,114<sub>N</sub>) y dicha superficie (S ; LF) del objeto, a partir de señales de medida finales (M) y retardos de emisión corregidos (L<sup>f</sup>), y
  - medios de reconstrucción geométrica de dicha superficie (S; LF) del objeto a partir de los tiempos de vuelo especulares determinados.

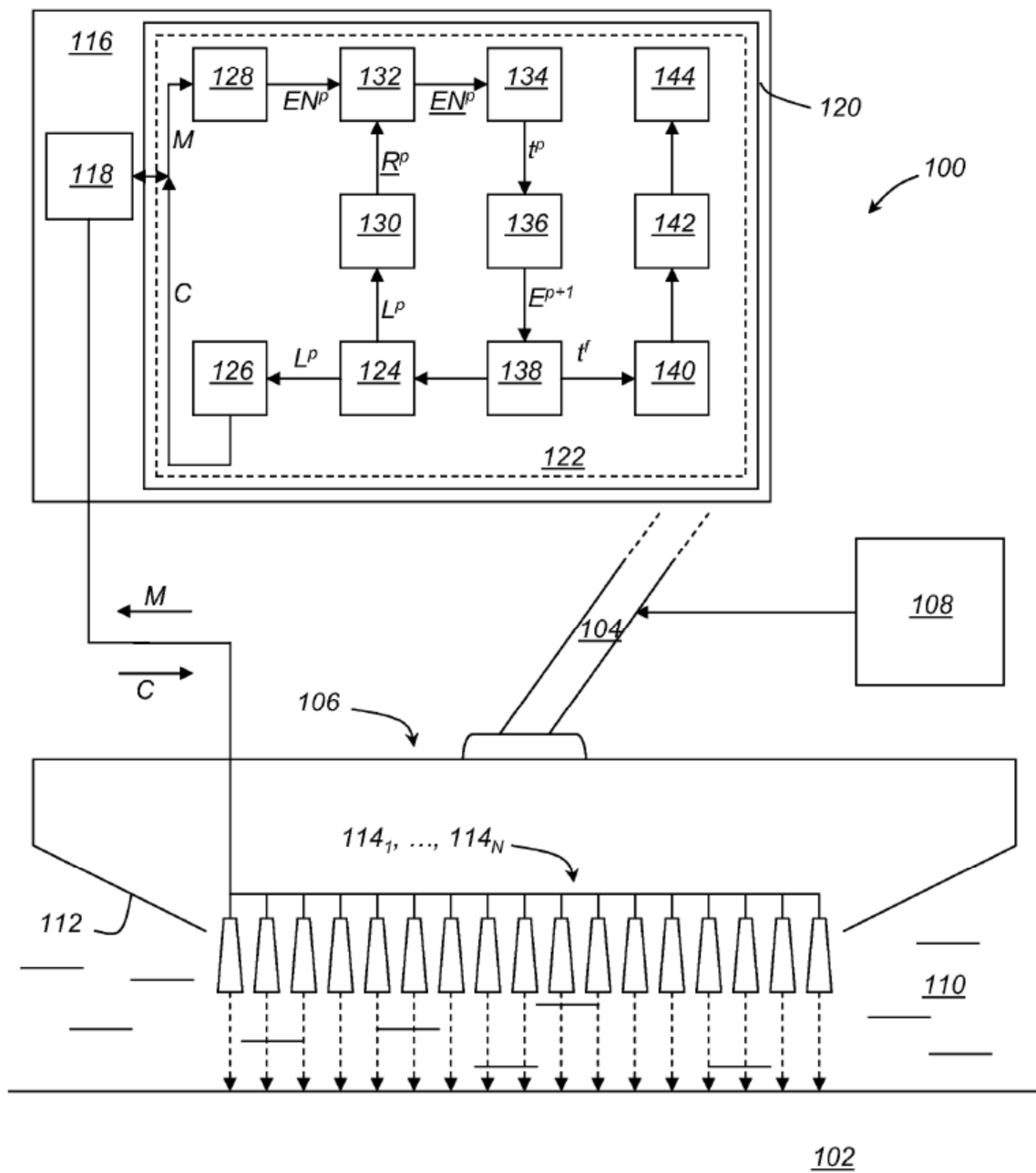


Figura 1



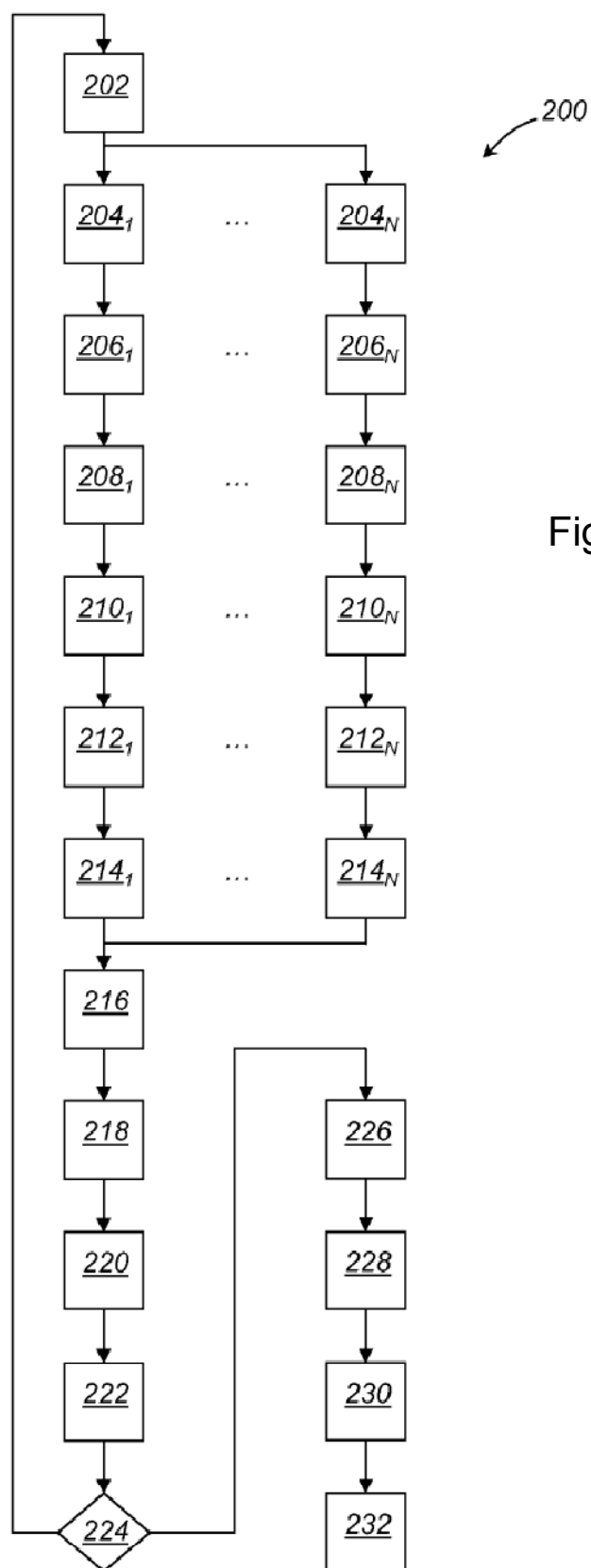


Figura 2

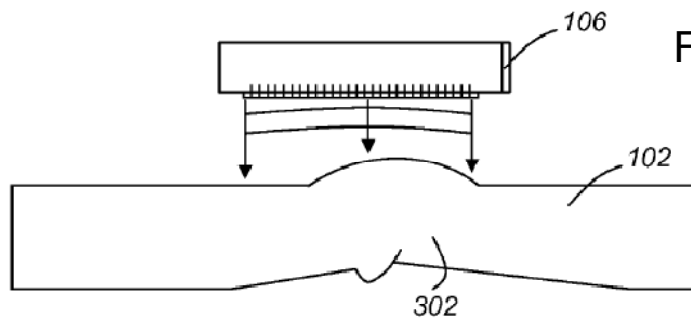


Figura 3

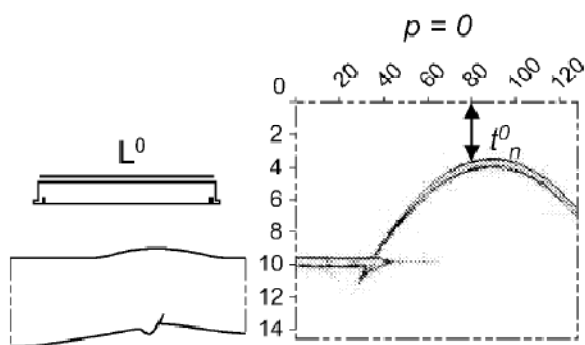


Figura 4

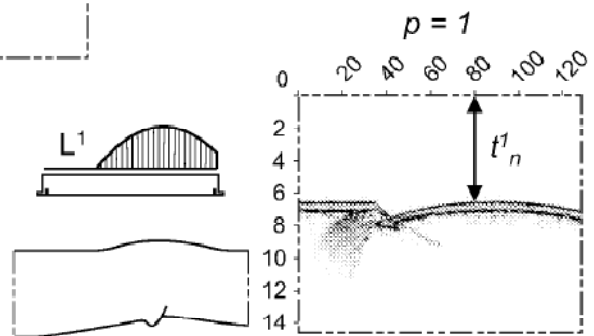


Figura 6

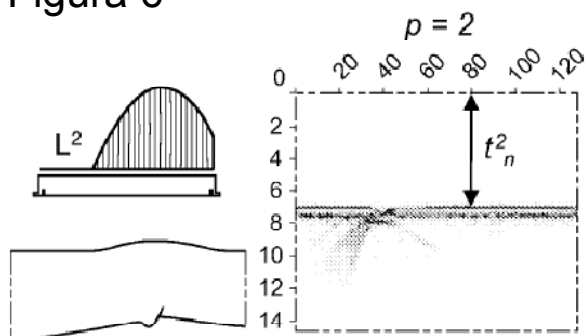


Figura 5

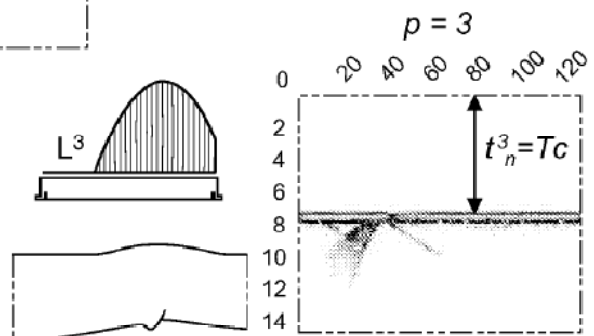


Figura 7

Figura 8A

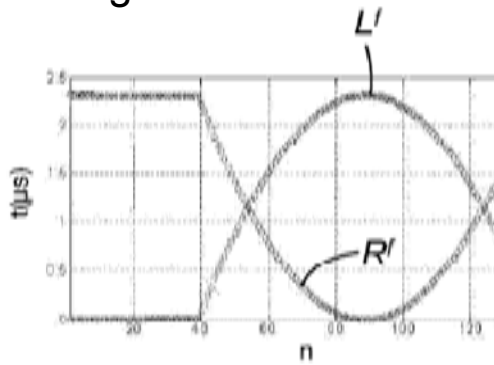


Figura 8B

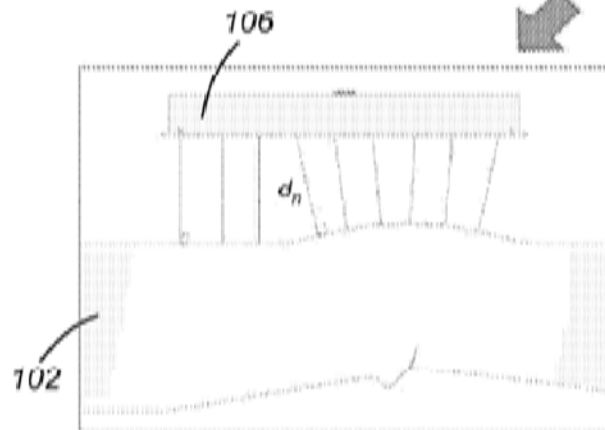
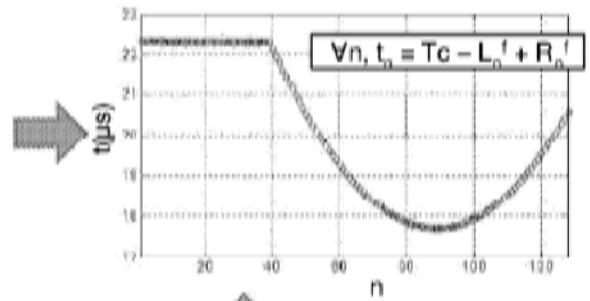


Figura 8C

Figura 9

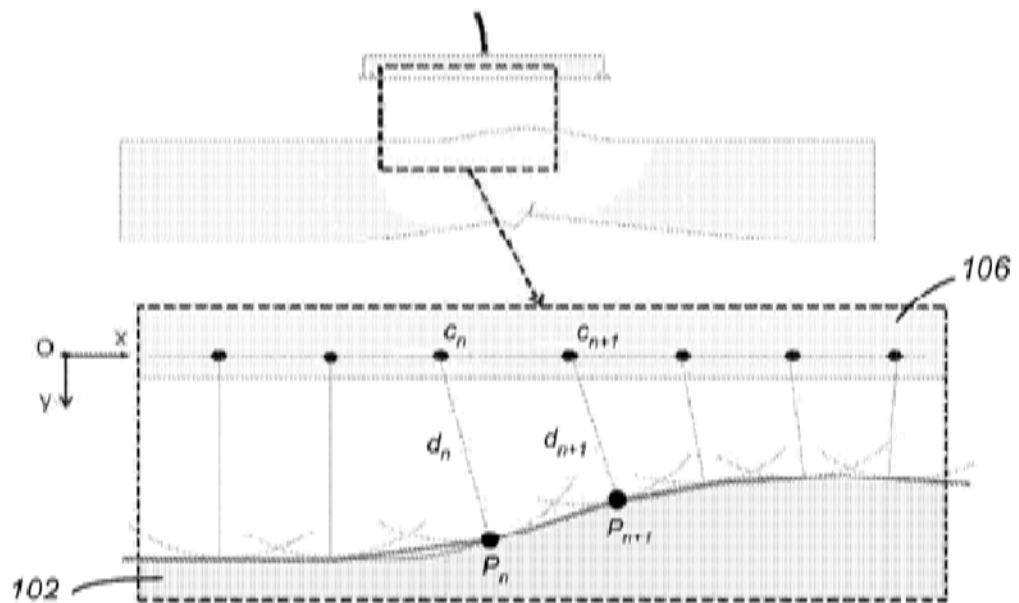


Figura 10

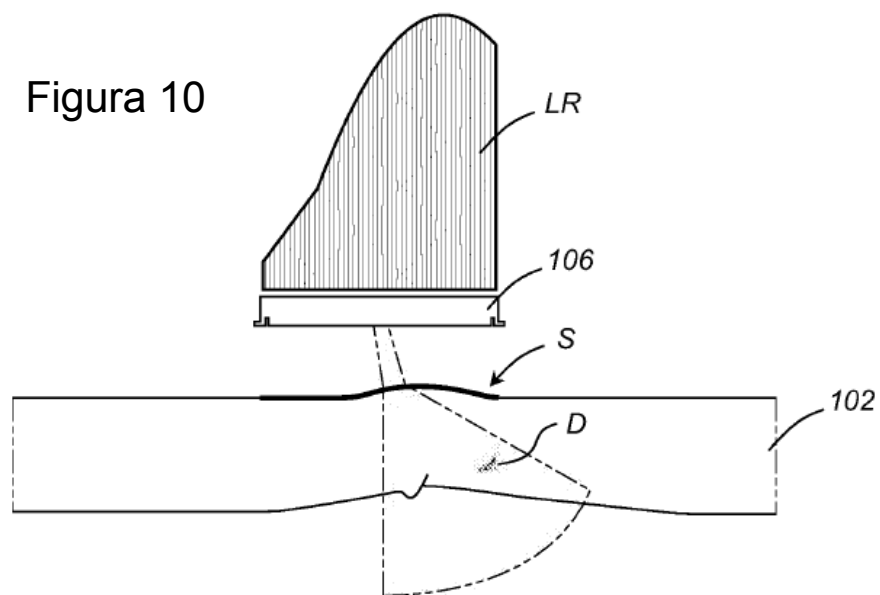


Figura 11

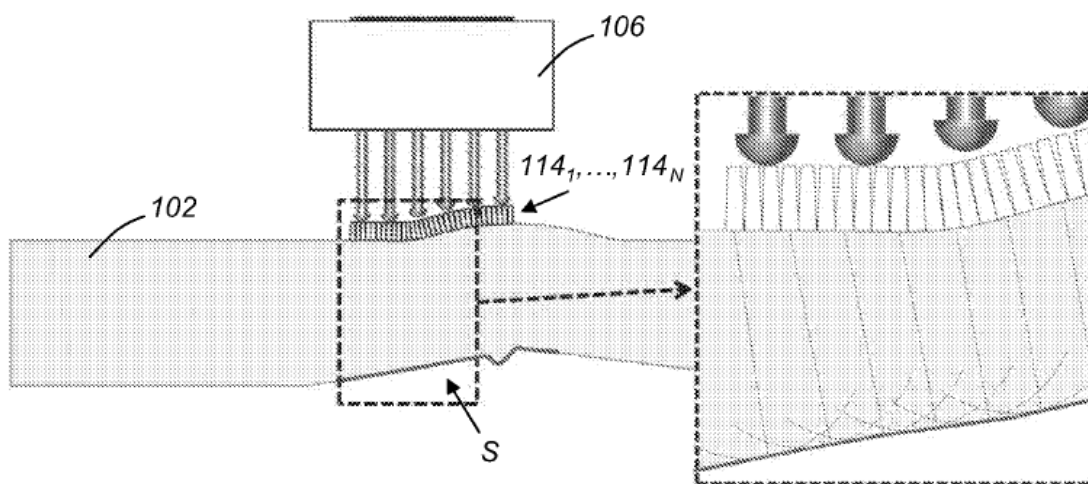


Figura 12

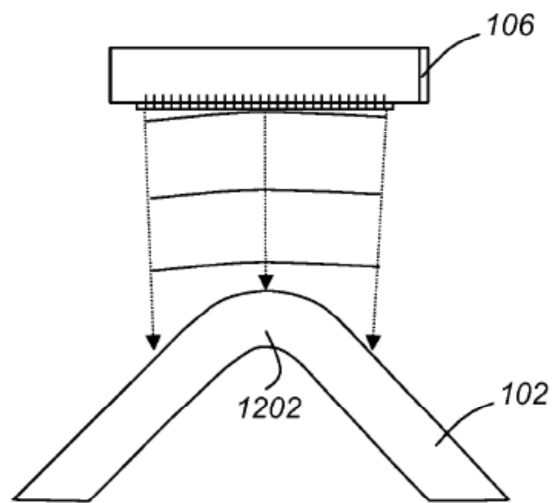


Figura 13

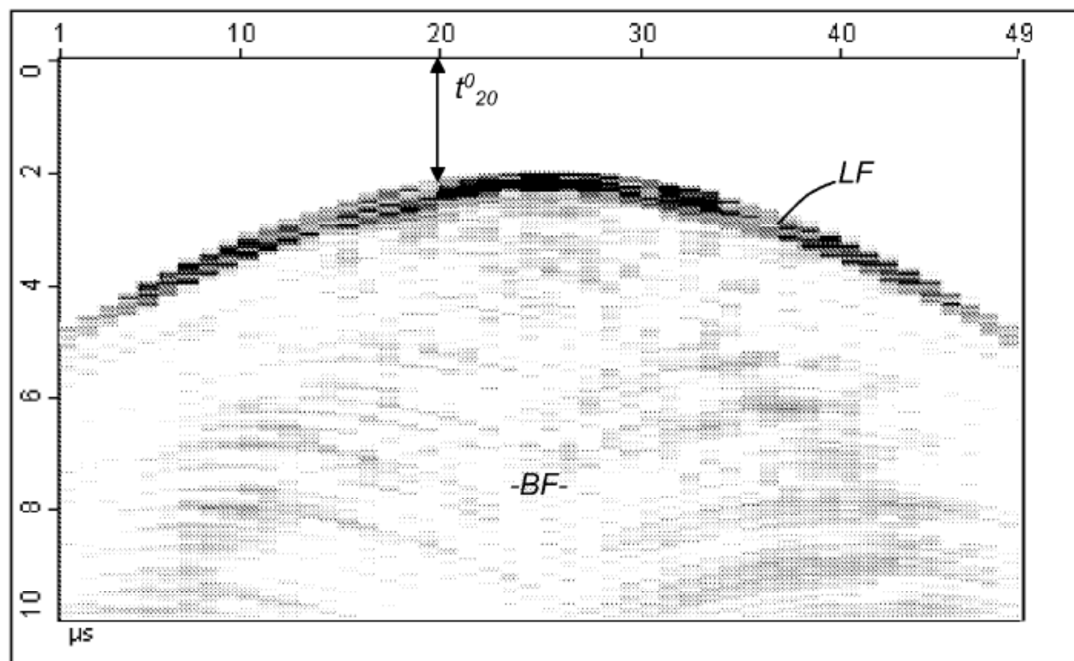


Figura 14

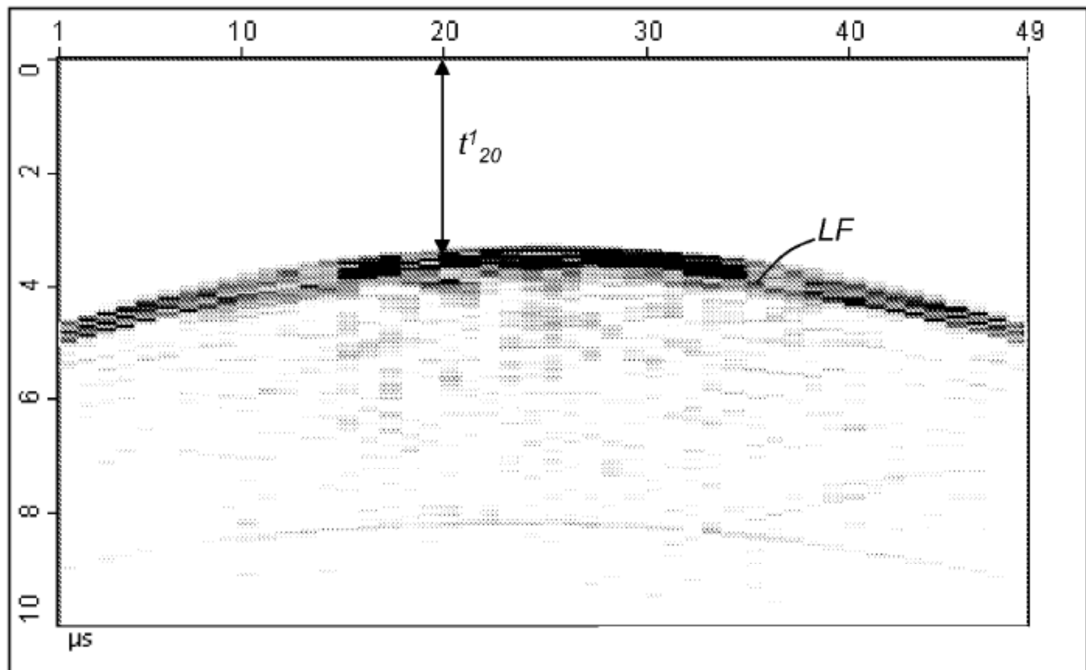


Figura 15

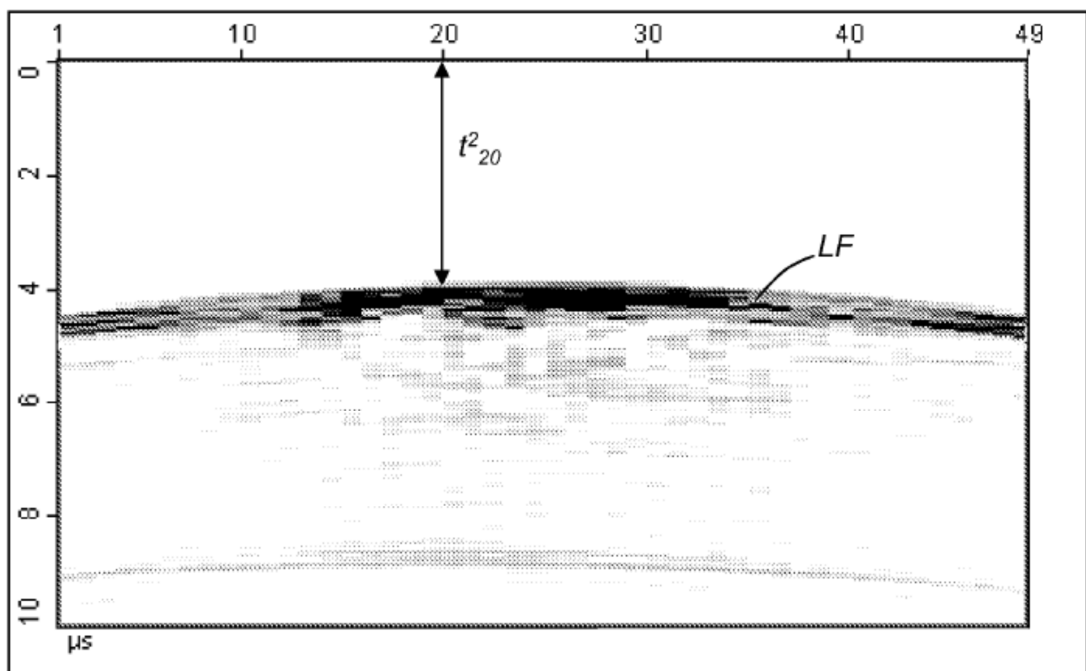


Figura 16

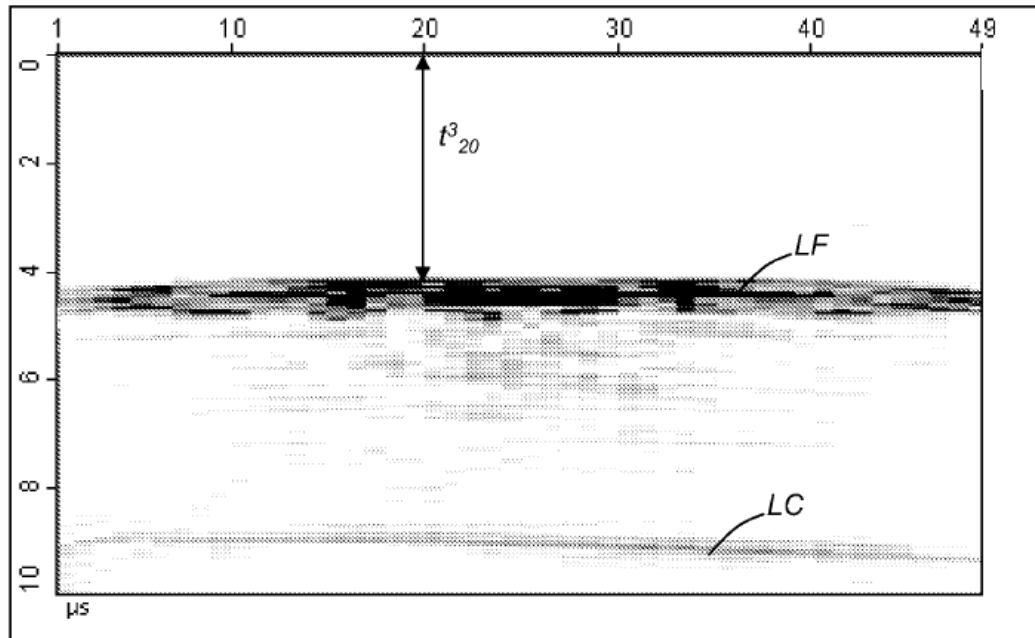


Figura 17

