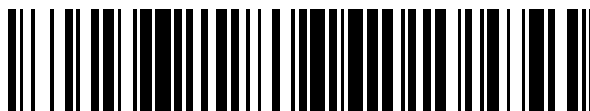


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 738 909**

51 Int. Cl.:

G01N 29/07 (2006.01)

G01L 1/16 (2006.01)

G01M 5/00 (2006.01)

G01L 1/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.02.2011** **E 11382026 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2019** **EP 2485026**

54 Título: **Sistema de supervisión de la salud estructural**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.01.2020

73 Titular/es:

THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-1596, US

72 Inventor/es:

KAWIECKI, GRZEGORZ MARIAN;
RODRÍGUEZ, ROSA MARÍA;
KUDELA, PAWEL y
OSTACHOWICZ, WIESLAW

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

Observaciones:

Véase nota informativa (Remarks, Remarques o Bemerkungen) en el folleto original publicado por la Oficina Europea de Patentes

ES 2 738 909 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

Sistema de supervisión de la salud estructural

Campo de la invención

- 5 La presente invención se refiere a un sistema de supervisión de la salud estructural, por ejemplo, un sistema que se utiliza en la evaluación no destructiva de una estructura tal como la estructura de una aeronave.

Antecedentes de la invención

Los sistemas de supervisión de la salud estructural están atrayendo cada vez más interés. Estos proporcionan un método no destructivo para evaluar la integridad de una estructura. Por ejemplo, el uso de sistemas de supervisión de la salud estructural en la industria aeroespacial se está haciendo más generalizado.

- 10 Esto es debido a que tales sistemas proporcionan un método no invasivo para evaluar la salud de una aeronave (o de algunos de sus componentes) que es generalmente más rápido y menos caro de llevar a cabo que sus homólogos convencionales. Es más, la incorporación de sistemas de supervisión de la salud estructural puede permitir intervalos de tiempo más largos entre las inspecciones de servicio, y puede hacer posible una vida de servicio prolongada de la aeronave.

- 15 Los sistemas de supervisión de la salud estructural se han venido utilizando con estructuras tanto de metal (por ejemplo, aluminio y aleaciones de aluminio) como de material compuesto.

- 20 Son conocidos los sistemas de supervisión de la salud estructural que comprenden conjuntos geoméricamente ordenados de transductores, tales como transductores piezoeléctricos, que supervisan la propagación de ondas elásticas a través de una estructura. Las anomalías dentro de la estructura reflejan las ondas elásticas, y estas reflexiones son detectadas por los transductores. Por ejemplo, la deslaminación de estructuras de material compuesto de resina-fibra y las grietas tanto en las estructuras metálicas como en las de material compuesto provocan reflexiones que pueden ser detectadas.

- 25 Además de la mera identificación de la presencia de una o más anomalías y/o de al menos una anomalía, es posible determinar la posición de una anomalía. Por ejemplo, se conoce la utilización de un conjunto geoméricamente ordenado distribuido de transductores. Las diferencias en los tiempos de llegada de la onda reflejada a los transductores se convierten en una distancia equivalente desde cada transductor, a partir de la cual puede determinarse la posición de la anomalía utilizando triangulación.

- 30 Sin embargo, estos sistemas son caros y requieren mucho tiempo para ser instalados, debido al elevado número de sensores distribuidos que deben proporcionarse y colocarse. Por otra parte, el gran número de sensores tiene como resultado una penalización en el peso de la aeronave, y también afecta los parámetros básicos de la estructura, tales como su distribución de inercia y rigidez.

- 35 Una alternativa a un conjunto geoméricamente ordenado distribuido de transductores consiste en utilizar un conjunto geoméricamente ordenado en fase de transductores. En tal conjunto geoméricamente ordenado, los transductores están situados en estrecha proximidad unos con respecto a otros. Como se comprende fácilmente en aplicaciones tales como antenas en conjunto geoméricamente ordenado en fase, los transductores son excitados utilizando una señal de excitación cuya fase varía entre los transductores, con lo que se efectúa un direccionamiento del haz. Los transductores están a la escucha de las señales reflejadas y determinan la posición de una o más anomalías y/o de al menos una anomalía haciendo uso del tiempo de vuelo medido de la reflexión y de la dirección conocida de propagación.

- 40 Sin embargo, tales sistemas de conjunto geoméricamente ordenado en fase también presentan desventajas. La técnica de direccionamiento de haz en la que se basan los conjuntos geoméricamente ordenados en fase requiere un complejo tratamiento de señal para extraer la información de dirección. Es más, tales sistemas presentan fugas de señal hacia los lados del conjunto geoméricamente ordenado, tales como lóbulos de trama de interferencia, conjuntamente con fuertes señales secundarias en ángulos diferentes del ángulo de direccionamiento deseado.
- 45 También, la precisión requerida en la formación del haz y en el direccionamiento exige requisitos de exactitud en las especificaciones y la instalación de los transductores.

Pueden encontrarse detalles adicionales sobre sistemas de la técnica anterior en los documentos US2003/0009300, EP-A-1674862 y "Rosette piezotransducers for damage detection" de Kawiecki et al., Smart Material and Structures, IOP Publishing Ltd., Bristol GB, vol. 11 n.º 2, 1 de abril de 2002, páginas 196 a 201.

- 50 Por ende, las técnicas establecidas de los conjuntos geoméricamente ordenados distribuidos y de los conjuntos

geométricamente ordenados en fase de transductores presentan complejidad y estrictos requisitos de fabricación y de diseño, lo que aumenta significativamente los gastos de fabricación y de integración dentro de una estructura. La complejidad de la generación y del tratamiento de los datos aumenta adicionalmente el coste.

5 En consecuencia, existe la necesidad de un sistema de supervisión de la salud estructural con una complejidad reducida, un coste reducido y una instalación más fácil.

Sumario de la invención

10 A continuación, se describirá un método para evaluar los daños dentro de una estructura que utiliza un sistema de supervisión de la salud estructural fuera del alcance de la presente invención con el fin de proporcionar un contexto a la presente invención. El sistema de supervisión de la salud estructural comprende uno o más, o un conjunto de, o al menos tres, receptores dispuestos en contacto operativo con la estructura, así como un transmisor, también en contacto operativo con la estructura.

15 El método comprende hacer funcionar el transmisor para excitar una onda elástica que se propaga a través de la estructura. La onda elástica puede ser generada por un elemento de los al menos tres, o el conjunto de los tres, o uno cualquiera, o cualquier combinación de ellos, o por un transmisor independiente. En caso de que sea independiente, el transmisor puede estar situado próximo al conjunto de los tres receptores.

El método comprende, adicionalmente, recoger las señales de supervisión desde los al menos tres receptores, a fin realizar una supervisión de las reflexiones de la onda elástica en cualesquiera anomalías existentes dentro de la estructura. Las señales de supervisión son analizadas para identificar una o más anomalías y/o al menos una anomalía dentro de la estructura.

20 El sistema utiliza un método no destructivo y puede ser aplicado a cualesquiera formas de estructura, tales como estructuras aerospaciales que pueden ser metálicas o de material compuesto. Se emplea un sistema activo que utiliza un transmisor para generar una onda elástica y que detecta, a continuación, las reflexiones de la onda elástica utilizando los receptores.

25 Se utiliza un simple conjunto geométricamente ordenado de uno o más, al menos tres receptores, o un número tan pequeño como tres, para identificar anomalías dentro de la estructura. De esta forma, si se compara con conjunto geométricamente ordenados distribuidos y con conjuntos geométricamente ordenados de transductores en fase, conocidos, se necesita un número menor de transductores. La posición de la anomalía puede identificarse y encontrarse resolviendo un simple sistema de ecuaciones lineales, en contraposición con los cálculos mucho más complejos que se necesitan para los conjuntos geométricamente ordenados en fase. Pueden utilizarse uno o más 30 conjuntos geométricamente ordenados de receptores con un método de tiempo de vuelo para ubicar una anomalía, o bien pueden utilizarse dos o más conjuntos geométricamente ordenados de receptores con el fin de ubicar la anomalía, de tal manera que cada conjunto geométricamente ordenado se utiliza para determinar la dirección de la anomalía.

35 Los transmisores pueden escogerse de entre muchas elecciones adecuadas. Por ejemplo, el transductor de transmisión puede consistir en un simple dispositivo que sea capaz tan solo de transmitir una onda elástica a la estructura. Los transductores de recepción pueden únicamente ser capaces de detectar ondas elásticas que se desplazan en la estructura. Sin embargo, se prefiere que se utilicen transductores para el transmisor y para los receptores, que puedan ser utilizados para excitar y detectar ondas elásticas que se desplazan dentro de la estructura. A este fin, son particularmente preferentes los transductores piezoeléctricos, tales como los transductores 40 piezoeléctricos de material compuesto de macrofibras. El transmisor y los receptores pueden unirse a la estructura de cualquier manera apropiada, tal como mediante los métodos que se describen en la siguiente descripción específica.

45 Opcionalmente, el análisis de las señales de supervisión comprende llevar a cabo una operación de diferenciación de la siguiente manera. Para cada receptor, se sustrae una señal de referencia de la señal de supervisión recogida por ese receptor. La señal de supervisión puede ser sometida a un tratamiento previo antes de la operación de diferenciación. Por ejemplo, la señal de supervisión puede ser sometida a filtración, eliminación del ruido, promediado de la señal, compensación de temperatura y descomposición en ondas fundamentales.

50 La señal de referencia para cada receptor puede haber sido recogida desde la estructura en un instante de tiempo en el que se encuentra en un estado conocido, tal como algún tiempo antes de entrar en servicio operativo o tras la fabricación y el ensamblaje, o bien durante la vida en servicio de la estructura.

La operación de diferenciación puede ser cualquier operación apropiada, por ejemplo, una sustracción de la señal de referencia a partir de la señal de supervisión o viceversa, o bien una división de la señal de supervisión por la señal de referencia o viceversa. Las señales de diferencia resultantes se utilizan entonces para identificar una o más

anomalías y/o al menos una anomalía dentro de la estructura, ya que se hace más fácil entonces identificar los sucesos de reflexión entre el ruido de las señales. Puede utilizarse una técnica de comparación con un umbral para identificar los sucesos de reflexión, por ejemplo, al buscar picos por encima de un nivel de umbral.

El análisis de la señal de supervisión para identificar una o más anomalías y/o al menos una anomalía puede comprender calcular el tiempo de vuelo de las reflexiones encontradas en las señales de diferencia. El tiempo de la señal según es esta recogida por los tres receptores puede ser referida al tiempo de transmisión de la onda elástica. Pueden calcularse las distancias correspondientes a partir de los tiempos de vuelo encontrados así. La posición de las una o más anomalías y/o de la al menos una anomalía puede determinarse e identificarse a partir de las distancias calculadas. Por ejemplo, la posición puede averiguarse y resolverse a partir de las distancias calculadas y las posiciones conocidas y predeterminadas del transmisor y de los receptores. En el caso de que se utilicen tres o más receptores, se tendrá como resultado un sistema sobredeterminado que, opcionalmente, puede resolverse para obtener una posición utilizando un método de mínimos cuadrados.

Desde un primer aspecto, la presente invención radica en un método para evaluar daños dentro de una estructura utilizando un sistema de supervisión de la salud estructural, que comprende un par de conjuntos geoméricamente ordenados. Un primer conjunto geoméricamente ordenado comprende al menos tres receptores dispuestos en contacto operativo con la estructura, así como un transmisor dispuesto en contacto operativo la estructura. Un segundo conjunto ordenado comprende al menos tres receptores dispuestos en contacto operativo con la estructura, así como un transmisor dispuesto en contacto operativo con la estructura. Los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo están separados uno del otro.

El método comprende propagar una onda elástica a través de la estructura utilizando el transmisor del primer conjunto geoméricamente ordenado, y recoger las señales de supervisión desde los al menos tres receptores del primer conjunto geoméricamente ordenado, a fin de efectuar un seguimiento de las reflexiones de la onda elástica en al menos una anomalía situada dentro de la estructura. El método comprende, adicionalmente, propagar una onda elástica a través de la estructura utilizando el transmisor del segundo conjunto geoméricamente ordenado y recoger las señales supervisadas desde los al menos tres receptores del segundo conjunto geoméricamente ordenado, a fin de realizar un seguimiento de las reflexiones de la onda elástica en al menos una anomalía situada dentro de la estructura.

Las señales de supervisión son analizadas para identificar la al menos una anomalía y para determinar una dirección desde los respectivos conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo hacia la al menos una anomalía. El método comprende utilizar las direcciones hacia la anomalía desde cada uno de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo, en combinación con las posiciones conocidas de los conjuntos geoméricamente ordenados en la estructura, para determinar la posición de la anomalía en la estructura.

El segundo conjunto geoméricamente ordenado puede ser como el primer conjunto geoméricamente ordenado, según se ha descrito anteriormente en las páginas de 3 a 6. Por ejemplo, la onda elástica puede ser generada por un solo elemento de los al menos tres, o por el conjunto de tres receptores, o por uno cualquiera o combinaciones de ellos, o bien por un transmisor independiente. Si es independiente, el transmisor puede estar situado próximo al conjunto de los tres receptores. También, los transmisores y receptores pueden ser transductores que pueden ser utilizados para excitar y detectar ondas elásticas que se desplazan dentro de la estructura. Son particularmente preferentes los transductores piezoeléctricos, tales como transductores piezoeléctricos de material compuesto de macrofibras.

Opcionalmente, en cada uno de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo, cada uno de los receptores es un transductor piezoeléctrico con un eje longitudinal y un eje transversal. Los receptores están dispuestos de tal manera que no hay ningún par de receptores que tengan ejes longitudinales alineados. Para cada receptor, las señales de supervisión pueden ser analizadas para determinar componentes de esfuerzo longitudinales y transversales que se utilizan en combinación con las orientaciones conocidas de los receptores dentro de cada conjunto geoméricamente ordenado, a fin de determinar la dirección de la anomalía.

Desde un segundo aspecto, la presente invención radica en un sistema de supervisión de la salud estructural para supervisar una estructura que comprende unos conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo. Un primer conjunto geoméricamente ordenado incluye al menos tres receptores, en contacto operativo con la estructura, y un transmisor, en contacto operativo con la estructura. Un segundo conjunto geoméricamente ordenado incluye al menos tres receptores, en contacto operativo con la estructura, y un transmisor, en contacto operativo con la estructura. El segundo conjunto geoméricamente ordenado está separado del primer conjunto geoméricamente ordenado.

El transmisor del primer conjunto geoméricamente ordenado está configurado para excitar una onda elástica para que se propague a través de la estructura, y un procesador está acoplado operativamente a los receptores del primer conjunto geoméricamente ordenado con el fin de recoger señales de supervisión desde cada uno de los al menos tres receptores. El transmisor del segundo conjunto geoméricamente ordenado está configurado para excitar

una onda elástica para que se propague a través de la estructura, y el procesador está acoplado operativamente a los receptores del segundo conjunto geométricamente ordenado con el fin de recoger señales de supervisión desde cada uno de los al menos tres receptores. El procesador está configurado para analizar las señales de supervisión para identificar al menos una anomalía existente dentro de la estructura, y para determinar una dirección desde los respectivos conjuntos geométricamente ordenados primero y segundo hacia la al menos una anomalía.

El procesador está configurado adicionalmente para utilizar las direcciones hacia la anomalía desde cada uno de los conjuntos geométricamente ordenados primero y segundo, en combinación con las posiciones conocidas de los conjuntos geométricamente ordenados en la estructura, para determinar la posición de la anomalía en la estructura.

Opcionalmente, un transductor puede procurar tanto el transmisor como uno de los al menos tres receptores de cada uno de los conjuntos geométricamente ordenados primero y segundo o de ambos. El transmisor puede estar situado próximo a al menos tres receptores de uno de los conjuntos geométricamente ordenados primero y segundo o de ambos.

De manera opcional, el procesador está configurado para analizar la señales de supervisión al llevar a cabo una operación de diferenciación en virtud de la cual, para cada receptor, una señal de referencia se sustrae de las señales de supervisión recogidas por ese receptor, y de tal modo que las señales de diferenciación resultantes se utilizan para identificar la al menos una anomalía situada dentro de la estructura. El sistema de supervisión de la salud estructural puede haberse configurado para recoger señales de referencia desde la estructura para cada receptor, opcionalmente después de que la estructura se considere lista para su uso operativo.

Opcionalmente, en cada uno de los conjuntos geométricamente ordenados primero y segundo, cada uno de los receptores consiste en un transductor piezoeléctrico con un eje longitudinal y un eje transversal, y en donde los receptores están dispuestos de manera que no existe ningún par de receptores que tengan ejes longitudinales alineados. Para cada receptor, el procesador puede estar configurado para analizar las señales de supervisión para determinar componentes de esfuerzo longitudinales y transversales y utilizar estas componentes en combinación con las orientaciones conocidas de los receptores dentro de cada conjunto geométricamente ordenado, a fin de determinar la dirección hacia la anomalía.

Otras características preferentes, pero opcionales, de este sistema de supervisión de la salud estructural se establecen en las reivindicaciones que se acompañan. Pueden llevarse a cabo variaciones de estas características según se ha descrito previamente con respecto al aspecto de método de la invención.

Breve descripción de los dibujos

A fin de que la presente invención pueda ser comprendida más fácilmente, se describirán a continuación realizaciones preferentes, a modo de ejemplo únicamente y con referencia a los dibujos siguientes, en los cuales:

la Figura 1 es una representación esquemática de un sistema de supervisión de la salud estructural de acuerdo con una realización de la invención, instalado en una estructura;

la Figura 2 muestra esquemáticamente un método para evaluar daños dentro de una estructura, de acuerdo con una realización de la invención;

la Figura 3 es una representación esquemática de una estructura con dos conjuntos geométricamente ordenados de transductores;

las Figuras 4A a 4D muestran cuatro disposiciones proporcionadas a modo de ejemplo de conjuntos geométricamente ordenados de transductores, incluyendo conjuntos geométricamente ordenados como los mostrados en la Figura 3;

la Figura 5 muestra esquemáticamente un método para instalar un sistema de supervisión de la salud estructural y su uso subsiguiente a la hora de evaluar la salud de la estructura a la que se ha fijado;

la Figura 6 muestra esquemáticamente un método para captar señales de referencia;

la Figura 7 muestra esquemáticamente un método para evaluar daños dentro de una estructura, de acuerdo con otra realización de la invención;

la Figura 8 muestra esquemáticamente un primer método para evaluar daños dentro de una estructura de acuerdo con otra realización más de la invención;

la Figura 9 es un gráfico que muestra señales diferenciales producidas por transductores de un sistema de supervisión de la salud estructural de acuerdo con una realización de la invención;

la Figura 10 es un gráfico que muestra correcciones en el tiempo de vuelo para las señales que se muestran en la Figura 9;

la Figura 11 es una representación esquemática destinada a mostrar las distancias recorridas por ondas desde una anomalía existente en una estructura hasta un conjunto geométricamente ordenado de tres transductores; y

la Figura 12 muestra esquemáticamente un segundo método para evaluar daños en una estructura de acuerdo con otra realización de la presente invención;

la Figura 13 es una representación esquemática de dos conjuntos geométricamente ordenados de transductores y una anomalía en una estructura;

la Figura 14 muestra con mayor detalle uno de los transductores de la Figura 13;
la Figura 15 muestra una aeronave equipada con sistemas de supervisión de la salud estructural de acuerdo con la presente invención, así como posibles ubicaciones para estos.

Descripción detallada de la invención

- 5 La Figura 1 muestra una estructura 10, en este ejemplo un panel de cubierta externa de material compuesto de fibra de resina para el fuselaje de una aeronave. La estructura 10 está provista de un sistema de supervisión de la salud estructural 100. El sistema de supervisión de la salud estructural 100 comprende uno o más conjuntos geoméricamente ordenados de transductores 105, sujetos a la estructura 10. En este ejemplo, los transductores 105 se han sujetado a una superficie interna de la estructura 10, si bien los transductores 105 pueden ser sujetos a una superficie externa o bien pueden proporcionarse dentro de la propia estructura 10. El conjunto geoméricamente ordenado de transductores 105 que se muestra en la Figura 1 está conectado a un procesador 120 a través de una conexión 130 de datos. Una conexión de datos adicional 140 permite que se remitan los datos a otros dispositivos conectados.
- 10 El sistema de supervisión de la salud estructural 100 supervisa la estructura 10 en busca de daños tales como un área de deslaminación dentro de la estructura 10 de material compuesto, como la que puede causarse por un objeto que golpea la estructura 10. El lugar del daño se indica por la referencia numérica 20 en la Figura 1. El sistema de supervisión de la salud estructural 100 puede ser utilizado de acuerdo con el método que se ilustra en la Figura 2.
- 15 En la etapa 210, un transductor 110 de entre el conjunto geoméricamente ordenado 105 se hace funcionar de tal modo que excita una onda elástica que se propaga a través de la estructura 10, tal como se muestra con la referencia numérica 30 en la Figura 1. Cuando la onda elástica incide en la sección deslaminada 20, una parte de la onda elástica será reflejada, tal como se muestra por la referencia numérica 40 en la Figura 1. En la etapa 220, el conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 se utiliza para recoger señales de las ondas elásticas detectadas. Estas señales incluirán una contribución de la onda elástica reflejada por el lugar del daño 20.
- 20 El conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 puede ser utilizado para recoger señales a lo largo de una ventana temporal correspondiente al tiempo que le lleva a la onda elástica propagarse hasta el borde más alejado de la estructura 10 y nuevamente de vuelta (o ligeramente más largo), a fin de garantizar que todos los sucesos de reflexión son captados. En la etapa 230, las señales son analizadas y todos los sucesos de reflexión que indican una o más anomalías y/o al menos una anomalía 20 dentro de la estructura 10 son identificados como indicaciones de daños potenciales 20 en la estructura 10.
- 25 En la etapa 240, se informa de las anomalías 20 encontradas. La notificación puede ser visual (por ejemplo, en forma de una presentación visual en una pantalla o similar), o puede corresponder al almacenamiento de los datos para su posterior recuperación e inspección (por ejemplo, guardando un archivo de datos que proporciona detalles sobre las anomalías 20 que se han encontrado). Tal como se indica por la referencia numérica 250, el método puede repetirse de manera tal, que la estructura 10 es supervisada periódica o continuamente por el sistema de supervisión de la salud estructural 100. La frecuencia con la que se repite el método de la Figura 2 puede escogerse a voluntad.
- 30 El procesador 120 del sistema de supervisión de la salud estructural puede adoptar muchas formas, siempre y cuando sea capaz de llevar a cabo el análisis necesario de las señales proporcionadas por los transductores 110. Se prefiere que el procesador 120 sea capaz de enviar señales de accionamiento a los transductores 150 que exciten ondas elásticas dentro de la estructura 10. Un ordenador adecuadamente programado es una buena elección para constituir el procesador 120. El procesador 120 puede estar situado cerca del conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110, tal como se muestra en la Figura 1, o bien puede estar situado a distancia con respecto al conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110.
- 35 Las señales procedentes de los transductores 110 pueden ser remitidas al procesador 120 por medio de un enlace 130 de datos de la longitud apropiada. El enlace 130 de datos puede ser un enlace de cable instalado o puede ser inalámbrico. Por otra parte, puede ser un enlace de uso dedicado, o puede ser un enlace compartido, por ejemplo, formando parte de un bus de datos compartido u otra red.
- 40 Opcionalmente, el procesador 120 puede tener un enlace de datos adicional 140 con el fin de permitir su conexión a otro dispositivo, por ejemplo, otro ordenador o un dispositivo de presentación visual. El enlace 140 de datos puede ser de cable instalado o inalámbrico, dedicado o compartido.
- 45 Son posibles diferentes disposiciones de los uno o más, y, preferentemente, tres o más, transductores 110 dentro de un conjunto geoméricamente ordenado 105. En realizaciones preferentes, se utilizan conjuntos geoméricamente ordenados 105 de cuatro transductores 110, de los cuales uno es un transductor de transmisión 110T y tres son transductores de recepción 110R. Ya actúen como transductor de transmisión 110T o como transductor de recepción 110R, se prefiere en la actualidad utilizar transductores piezoeléctricos de material compuesto de fibra

macroscópica o macrofibra como los que se encuentran disponibles en la Smart Material Corporation, 1990 Main Street, Suite 750, Sarasota, Florida 34236, EE. UU. Tales transductores son capaces tanto de transmitir como de detectar ondas elásticas. El modo como los transductores 110 se disponen en la estructura 10 puede particularizarse de acuerdo con el lugar en el que han de fijarse.

5 La Figura 3 muestra un segundo ejemplo de una estructura 10, en esta ocasión un panel de cubierta externa de un ala para una aeronave. La estructura 10 se muestra provista de dos disposiciones de conjuntos geoméricamente ordenados 105 de transductores 110. Se muestra una primera disposición de un conjunto geoméricamente ordenado 105A que comprende transductores 110 situados cerca de una esquina o vértice de la estructura 10. Se muestra una segunda disposición de un conjunto geoméricamente ordenado 105C que comprende transductores 10 110 ubicados en posición central en la estructura 10. Las Figuras 4A-D muestran cuatro disposiciones proporcionadas a modo de ejemplo de conjuntos geoméricamente ordenados 105A-D de transductores 110R, T. Las disposiciones 105A y 105B de las Figuras 4A y 4B resultan más adecuadas para posiciones de esquina en una estructura 10, en tanto que las disposiciones 105C y 105D son más adecuadas para posiciones centrales.

15 Las Figuras 4A-D muestran transductores de recepción 110R que tienen secciones transversales rectangulares. La sección transversal rectangular corresponde a los ejes longitudinal y transversal del transductor de recepción 110R. En las cuatro disposiciones que se muestran en las Figuras 4A-D, los transductores de recepción 110R tienen sus ejes longitudinales extendiéndose en diferentes direcciones, de tal manera que no hay ningún par de transductores 110R que estén alineados de forma que sean paralelos. Sin embargo, en otras realizaciones contempladas pueden extenderse en paralelo dos o más transductores de recepción 110R.

20 La Figura 4A muestra un conjunto geoméricamente ordenado 105A que incluye tres transductores de recepción 110R y un transductor de transmisión 110T. Los transductores de recepción 110R se han dispuestos de tal manera que no hay ningún par de transductores de recepción 110R que sean paralelos. Un primer par de transductores de recepción 110R₁ y 110R₂ están dispuestos formando un ángulo recto uno con respecto al otro, de tal modo que un tercer transductor de recepción 110R₃ biseca el ángulo recto.

25 Tal como se muestra en la Figura 3, los transductores de recepción 110R pueden estar situados de tal modo que los dos transductores de recepción 110R₁ y 110R₂ que forman el ángulo recto se extienden generalmente según las direcciones de los bordes de la estructura 10 que forman la esquina, de forma que el tercer transductor de recepción 110R₃ apunta hacia el centro de la estructura 10. El transductor de transmisión 110T está situado próximo a los tres extremos de los transductores de recepción 110R, en el lugar en que se unen.

30 La Figura 4B muestra una disposición 105B que es similar a la disposición de la Figura 4A. Los tres transductores de recepción 110R tienen la misma orientación, pero el transductor de transmisión 110T se ha desplazado de manera que está próximo al otro extremo del transductor bisector 110R₃. Esto es lo mismo que decir que el transductor de transmisión 110T es adyacente a un extremo del transductor de recepción 110R₃ que biseca el ángulo recto comprendido entre los otros dos transductores de recepción 110R₁ y 110R₂, a saber, el extremo que está más alejado de los otros dos transductores de recepción 110R₁ y 110R₂.

35 La Figura 4C muestra una disposición compacta 105C de cuatro transductores 110. Se han dispuesto tres transductores de recepción 110R formando 60° entre sí, formando así un triángulo equilátero que rodea un transductor de transmisión 110T situado en posición central. La Figura 4D muestra una disposición adicional 105D en la que un transductor de transmisión central 110T está situado entre tres transductores de recepción 110R que se irradian hacia fuera, dispuestos formando ángulos de 120° unos con otros. Como se apreciará, en cualquiera de las disposiciones individuales 105A-D, no existe ningún par de transductores de recepción 110R que estén alineados paralelamente uno con otro.

40 La Figura 5 muestra un método para instalar y hacer funcionar un sistema de supervisión de la salud estructural 100 de acuerdo con la presente invención. Según se indica por la referencia 510, el sistema de supervisión de la salud estructural 100 se ha instalado en, o sobre, una estructura 10. Esto puede llevarse a cabo durante la fabricación de la estructura 10. Por ejemplo, si se instalan en una estructura de material compuesto, los transductores 110 y las conexiones asociadas pueden extenderse conjuntamente con los tejidos de fibra y solidificarse dentro de la matriz de resina a medida que se está fabricando una estructura 10 de material compuesto, de tal modo que formen una parte integral de la estructura 10. El cableado puede entonces conectarse al procesador 120, que, de la forma más probable, se proporciona externamente.

45 Alternativamente, los uno o más transductores 110, preferentemente tres o más, pueden fijarse a la estructura 10 de un cierto número de formas diferentes. Los transductores 110 pueden unirse superficialmente a la estructura 10, fijados utilizando adhesivos, sujetos a la estructura 10 mediante el uso de elementos de aseguramiento mecánicos tales como tornillos o remaches, o por cualquier otro modo que proporcione una fijación firme y duradera.

55 Los transductores 110 pueden estar situados dentro de unos rebajes proporcionados en la estructura 10, por

ejemplo, en los bordes o en una superficie de la estructura 10. El sistema de supervisión de la salud estructural 100 puede instalarse en estructuras existentes 10 después de ser fabricadas, por ejemplo, en partes de una aeronave ya en servicio.

Los transductores 110 pueden sujetarse simplemente a una superficie de la estructura 10, ya sea interna o externamente a la superficie, o bien la estructura puede ser modificada para acomodar mejor los transductores 110. Por ejemplo, si se montan externamente, pueden formarse unos rebajes en la superficie exterior de la estructura 10 con el fin de permitir que se monten los transductores 110 y se restablezca una superficie nivelada de la estructura 10. La ubicación de los transductores 105 internamente presenta ventajas en cuanto a que los transductores 105 son protegidos de factores medioambientales tales como la radiación ultravioleta y el hielo, y también en cuanto a que no afectan a la aerodinámica de la aeronave 50. Sin embargo, la ubicación de los transductores 105 internamente puede dar lugar a problemas de acceso que hacen preferible la fijación de los transductores 105 a una superficie externa. Además, algunas estructuras 10 pueden no tener superficies internas y externas propiamente dichas, por ejemplo, las vigas.

Volviendo al método de la Figura 5, una vez que se ha instalado el sistema de supervisión de la salud estructural 100, según se indica por la referencia 510, las señales de referencia son recogidas según se indica por la referencia 520 y conforme se describe con mayor detalle más adelante, con referencia a la Figura 6. Esencialmente, el método es similar a la recogida de señales una vez que la estructura 10 se encuentra en uso, es decir, un transductor de transmisión 110T lanza una señal elástica a través de la estructura y unos transductores de recepción 110R registran las señales que reciben. Preferentemente, las señales de referencia se recogen una vez que la estructura 10 se ha instalado en su configuración final (por ejemplo, una vez que se ha unido un panel de fuselaje a un fuselaje de aeronave completo). Las señales de referencia son recogidas de cada transductor de recepción 110R cuando la estructura 10 se encuentra en su estado intacto, sin daños. Si bien no está presente ninguna anomalía, las señales de referencia contendrán sucesos de reflexión debidos al hecho de que la onda elástica es reflejada por rasgos o formaciones deliberadas contenidas en la estructura 10, tales como bordes, remaches, elementos de sujeción y juntas de unión con elementos de aporte de rigidez u otras estructuras de soporte.

Las señales de referencia son almacenadas por el procesador 120 para su uso posterior, durante el curso del funcionamiento de la estructura 10. La señal de referencia para cada sensor o transductor 110R puede haber sido recogida de la estructura intacta en un instante de tiempo en el que dicha estructura se encuentra en un estado conocido, tal como algún tiempo después de su fabricación y ensamblaje, y antes de su servicio operativo.

Puede ser también preferible obtener señales de referencia nuevas y/o de reemplazo subsiguientes a medida que la estructura se somete a un uso operativo y al mantenimiento periódico, tal como durante una inspección estructural periódica y periodos de mantenimiento, así como en otros momentos apropiados. De esta forma, tales estructuras pueden ser supervisadas en busca de cambios desde un estado operativo nominal, ya sea posterior a la fabricación, ya sea en cualquier otro momento o instancia tras la cual la estructura se considere lista para su uso operativo.

La estructura 10 entra en su vida de servicio y es supervisada periódicamente por medio del sistema de supervisión de la salud estructural 100, tal como se ha indicado por la etapa 530 y el bucle de retorno 540. Como se ha descrito anteriormente con referencia a la Figura 2, se utiliza un transductor de transmisión 110T para excitar una onda elástica que se propaga a través de la estructura 10, y los transductores de recepción 110R recogen señales de supervisión que incluyen reflexiones de la onda elástica. Para identificar las anomalías existentes dentro de la estructura 10, la señal de referencia para el transductor 110R apropiado se sustrae de la señal de supervisión con el fin de eliminar (o al menos minimizar) las contribuciones de las formaciones intencionadas y, así, hacer más evidentes las reflexiones en cualesquiera anomalías 20 existentes dentro de la estructura 10.

Se describirá a continuación un método para recoger las señales de referencia, el cual se ilustra en la Figura 6. Según se indica por la referencia 610, se utiliza el procesador 120 para accionar el transductor de transmisión 110T al proporcionarle una señal que hace el transductor de transmisión 110T oscile. Estas oscilaciones son transmitidas a la estructura 10 y, de esta forma, se propagan a través de la estructura 10. El procesador 120 también gobierna la recogida de las señales producidas por los transductores de recepción 110R durante un periodo de tiempo especificado tras haberse excitado la onda elástica, tal como se muestra por la referencia 620.

La propagación de las ondas reflejadas hacia atrás, de vuelta a los transductores de recepción 110R, hace que los transductores de recepción 110R oscilen y produzcan una señal eléctrica oscilante correspondiente que es captada y almacenada por el procesador 120, según se muestra por la referencia numérica 630. Preferentemente, la relación entre señal y ruido en las señales de referencia se mejora a través de unas etapas de repetición 610 y 620, de tal manera que se excita una serie de ondas elásticas y se obtiene una serie de señales de referencia de cada vez, acumulativamente, a fin de aumentar los datos estadísticos.

Los sistemas de supervisión de la salud estructural 100 de acuerdo con la presente invención pueden llevarse a la práctica de diferentes formas. Se describirán a continuación dos realizaciones preferentes en el momento presente. La primera realización se sirve de un método de tiempo de vuelo para localizar la posición de una anomalía 20 o de

más de una anomalía 20, utilizando un único conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110. La segunda realización emplea dos o más conjuntos geoméricamente ordenados 105 de transductores 110. Cada conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 se utiliza para determinar una dirección hacia una anomalía 20 o direcciones hacia más de una anomalía 20. Las direcciones proporcionadas por los dos o más conjuntos geoméricamente ordenados 105 se utilizan para determinar la posición de la anomalía 20 o de las más de una anomalías 20 por triangulación.

La Figura 7 muestra con mayor detalle un primer método de funcionamiento del sistema de supervisión de la salud estructural 100, que emplea una determinación de tiempo de vuelo. Según se indica por la referencia 710, el procesador 120 excita al transductor de transmisión, y este lanza una onda elástica a través de la estructura 10. El procesador 120 comienza entonces la captación 720 de señales de supervisión, al recoger y almacenar las señales de supervisión producidas por los uno o más transductores de recepción 110R. Como se ha descrito anteriormente en relación con la Figura 6, la relación entre señal y ruido puede ser mejorada por medio de unas etapas de repetición 710 y 720, a fin de acumular señales de supervisión durante la propagación de dos o más ondas elásticas.

Según se indica por la referencia 730, de la señal de supervisión producida por cada transductor de recepción 110R se sustrae la señal de referencia asociada para ese transductor 110R, a fin de producir una señal de diferencia. Según se indica por la referencia 740, el procesador 120 analiza las señales de diferencia que ha producido para identificar los sucesos de reflexión dentro de las señales de diferencia. El método continúa entonces para cada suceso de reflexión identificado, de la manera que sigue.

Si no se ha detectado ningún suceso de reflexión, el método puede cerrar un bucle de vuelta al inicio 710, a través de los caminos 745 y 790. Cuando se detectan sucesos de reflexión, el método continúa a través de las etapas 750, 760 y 770, y se repite para cada suceso de reflexión a través de un bucle de retorno 775. En la etapa 750, se determina el tiempo de vuelo para el suceso de reflexión en cada una de las señales de diferencia.

Por ejemplo, el procesador 120 tiene un reloj asociado al que se referencian el lanzamiento de la onda elástica, según se indica por la referencia 710, y la grabación de las señales de supervisión, según se indica en la referencia 720. Esto permite que el tiempo transcurrido entre el lanzamiento y el suceso de reflexión sea detectado y determinado. En la etapa 760, el procesador 120 convierte cada uno de los tiempos de vuelo encontrados en la etapa 750 en la distancia equivalente desde el transductor asociado 110, y utiliza entonces triangulación para determinar la posición de la anomalía que da lugar al suceso de reflexión.

En la etapa 770, el procesador 120 realiza una comprobación para determinar si otros sucesos de reflexión requieren tratamiento. Si es así, el método cierra un bucle de vuelta a través del camino 775; o bien, en caso contrario, el método prosigue por la etapa 780, en la que el procesador 120 produce un informe de las anomalías identificadas y ubicadas. Este informe puede ser presentado visualmente de inmediato o puede corresponder a una acumulación de datos, dentro de un archivo de datos o similar, para una inspección posterior. Por ejemplo, el procesador 120 puede actualizar un archivo de datos para añadir nuevas anomalías recientemente descubiertas en la última iteración del método. Una vez completada la etapa de notificación 780, el método cierra un bucle de vuelta a lo largo del camino 790 para retornar a la etapa 710.

Se apreciará que el método de la Figura 7 (y el método de la Figura 8 que se describirá a continuación) se basan en un único conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110. La posición de la anomalía 20 se encuentra mediante triangulación de los resultados obtenidos de los transductores 110 del conjunto geoméricamente ordenado 105. En el caso de que se hayan proporcionado más de un conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 en la estructura 10, cada conjunto geoméricamente ordenado 105 determinará una posición para una anomalía 20. Las posiciones 30 determinadas para la anomalía 20 puede ser combinadas para proporcionar una única posición para la anomalía 20. Cuando los conjuntos geoméricamente ordenados 105 son distribuidos, el hecho de combinar las posiciones de esta forma incrementa la precisión.

La Figura 8 muestra un método para hacer funcionar el sistema de supervisión de la salud estructural 100 como el de la Figura 7, aunque se describe con mayor detalle y también incluye algunas etapas adicionales.

Las etapas 810 y 820 se corresponden ampliamente con las etapas 710 y 720 de la Figura 7. En consecuencia, se lanza una onda elástica según se indica por la referencia 810 y las señales de supervisión son captadas según se indica por la referencia 820. Sin embargo, se introduce una pausa en la etapa 815, de tal manera que existe un corto retardo entre el lanzamiento de la onda elástica y la captación de las señales de supervisión. Esto se hace para garantizar que la señal de salida de gran amplitud no es detectada en las señales de supervisión.

En la etapa 830, el procesador 120 calcula las señales de diferencia. Esto se hace sustrayendo la señal de referencia almacenada de la señal de supervisión que se acaba de captar para cada transductor de recepción 110R.

En realidad, no es posible una simple sustracción de la señal de referencia con respecto a la señal de supervisión

asociada, debido a la presencia de muchos factores como el ruido aleatorio, efectos de temperatura y desplazamientos temporales debidos a la imprecisión eléctrica. Se sabe que la sustracción de dos señales grabadas en diferentes instantes de tiempo, y a pesar de unas condiciones muy similares, conducirá a un ruido coherente, y la presente situación no es una excepción.

5 De hecho, en el caso de que la señal reflejada en la lesión sea de débil intensidad, los niveles de ruido coherente pueden ser lo suficientemente elevados como para hacer muy difícil la detección de daños, o, en ocasiones, imposible. Sin embargo, pueden aplicarse algunas técnicas de tratamiento de señal bien conocidas con el fin de obtener una alta relación entre señal y ruido, tales como la filtración, la supresión del ruido, el promediado de la señal, la compensación de la temperatura, la descomposición en ondas fundamentales, etc. Una introducción
10 general a las técnicas de tratamiento de señales seleccionadas se proporciona, por ejemplo, por la divulgación de Staszewski, W. J., 2002, "Intelligent signal processing for damage detection in composite materials", Composites Science and Technology [Ciencia y tecnología de los materiales compuestos], Vol. 62, Nº 7-8, págs. 941-950. Se describen procedimientos de supresión del ruido basados en el análisis de ondas fundamentales por la divulgación de SMI, I., Soragan, J. J. y Siew, W. H., 2000, "A noise reduction technique for online detection and location of partial
15 discharges in high voltage cable networks", Meas. Sci. Technol., Vol. 11, págs. 1708-1713, y en la de Major, A. G., Fretwell, H. M., Dugdale, S. B., Rodríguez-González, A. R. y Alam, M. A., 1997, "De-noising of two-dimensional angular correlation of positron annihilation radiation data using Daubechies wavelet thresholding", J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 9, págs. 10293-10299. Técnicas de compensación de la temperatura se describen, por ejemplo, en la divulgación de Konstantindis, G., Wilcox, P. D. y Drinkwater, B. W., 2007, "An Investigation into the Temperature
20 Stability of a Guided Wave Structural Health Monitoring System Using Permanently Attached Sensors" ("Una investigación sobre la estabilidad de la temperatura en un sistema de supervisión de la salud estructural por ondas guiadas que utiliza sensores fijados de forma permanente"), IEEE Sensors Journal, Vol. 7, n.º 5, págs. 905-912, y en la de Lu, Y. y Michaels, J. E., 2005, "A Methodology for Structural Health Monitoring with Diffuse Ultrasonic Waves in the Presence of Temperture Variations", Ultrasonics, Vol. 43, págs. 717-731.

25 Puede hacerse una selección de estas técnicas para proporcionar la precisión que se desee en los resultados obtenidos, tal y como se conoce bien en la técnica. Este tratamiento previo de las señales de supervisión se lleva a cabo en la etapa 825. Una vez que la señal de supervisión ha sido previamente tratada según se indica por la referencia 825, se realiza la sustracción conforme se indica por la referencia 830.

30 En la etapa 835, las señales de diferencia son sometidas a una operación de comparación con un umbral por parte del procesador 120, tal y como se describirá a continuación con referencia al conjunto geométricamente ordenado 105 de transductores 110 que se muestra en la Figura 11. Como puede observarse, el conjunto geométricamente ordenado 105 se corresponde con el conjunto geométricamente ordenado 105C mostrado en la Figura 4C. Así, pues, tres transductores de recepción 110R están unidos superficialmente a una estructura 10 formando ángulos de 60 grados unos con otros de manera que componen un triángulo equilátero, con el transductor de transmisión 110T
35 unido superficialmente en el centro.

Dicho conjunto geométricamente ordenado puede producir señales de diferencia como las que se han mostrado en la Figura 9. En la Figura 9 se muestran tres señales de diferencia provenientes de cada uno de los tres transductores de recepción 110R, etiquetadas con las leyendas 0, 60 y 120. En la mayoría de las situaciones, los sucesos de reflexión contenidos en cada señal de supervisión llegan a cada transductor de recepción 110R con un
40 desplazamiento temporal diferente, y ello se refleja en las señales de diferencia que muestran en la Figura 9. El elemento dispuesto a 60 gados es el primero en detectar un suceso de reflexión en la lesión 20 dentro de la estructura 10.

El ejemplo de la Figura 9 muestra señales de diferencia que fueron obtenidas de cálculos numéricos. De esta forma, los problemas reales anteriormente expuestos que dan lugar a la necesidad de tratar previamente las señales de
45 supervisión no se aplican aquí. Sin embargo, la localización del daño sigue siendo potencialmente un reto, debido a las muy pequeñas diferencias entre las señales de referencia y de supervisión.

A fin de identificar los sucesos de reflexión, se seleccionan picos que exceden un cierto umbral. Un ejemplo de un nivel de umbral se muestra en la Figura 9. Este nivel de umbral puede escogerse en cualquier valor apropiado, por ejemplo, el nivel de umbral puede escogerse empíricamente mediante la recogida de datos de muestra y la
50 inspección de las señales de diferencia resultantes para seleccionar a ojo un cierto nivel de umbral.

Según se indica por la referencia 840, se identifican anomalías a partir de los sucesos de reflexión mostrados como picos dentro de las señales de diferencia que superan el nivel de umbral. Si no se encuentran anomalías, el método puede cerrar un bucle de vuelta al inicio en la etapa 810, a través de los caminos indicados por las referencias 845 y 890.

55 Suponiendo que se identifican anomalías, el método prosigue por la etapa 850, en la que se capta el tiempo de vuelo para cada suceso de reflexión identificado en las señales de diferencia de cada uno de los tres transductores de recepción 110R. El tiempo de vuelo aparente que puede ser deducido de cuando el pico supera por primera vez

el nivel de umbral (mostrado como t_2 en la Figura 10) es, ventajosamente, corregido con el fin de tener en cuenta el comienzo real del paquete de ondas asociado que está normalmente oculto por el ruido (mostrado como t_0 en la Figura 10).

- 5 Puede determinarse una corrección apropiada t_0 , por ejemplo, por un método de correlación (suponiendo que el paquete de ondas reflejadas será similar al paquete de ondas excitadas). Una vez realizadas las correcciones del tiempo de vuelo, los desplazamientos temporales en la señal de diferencia para cada transductor de recepción 110R se definen como:

$$\hat{t}_i = t_i - t_0 \quad i = 1, 2, 3 \quad \text{Ec. (1)}$$

- 10 A continuación se determina, en la etapa 860, la distancia recorrida por los paquetes de ondas según son detectados por cada transductor de recepción 110R. Estas distancias se muestran en la Figura 11. Las distancias R_1 , R_2 , R_3 para que un paquete de ondas generado por el transductor de transmisión 110T se desplace hasta la anomalía 20, en la que se reflejará desde el punto P situado en las coordenadas (x_p, y_p) , y viaje entonces de vuelta hasta cada uno de los tres transductores de recepción 110R, se definen como sigue.

$$\begin{aligned} R_1 &= R_A + R_{S1} \\ R_2 &= R_A + R_{S2} \\ R_3 &= R_A + R_{S3} \end{aligned} \quad \text{Ec. (2)}$$

siendo R_A la distancia de salida mostrada en la Figura 11, y R_{S1} , R_{S2} y R_{S3} son las distancias de llegada que se muestran en la Figura 11. Estas distancias se relacionan con los desplazamientos temporales encontrados en la etapa 850 de conformidad con las siguientes relaciones.

$$\begin{aligned} R_1 &= \hat{t}_1 c_g \\ R_2 &= \hat{t}_2 c_g \\ R_3 &= \hat{t}_3 c_g \end{aligned} \quad \text{Ec. (3)}$$

donde c_g es la velocidad de grupo del modo de propagación apropiado del paquete de ondas. Una vez encontradas las distancias R_1 , R_2 y R_3 , puede determinarse la posición de la anomalía de la siguiente manera.

- 25 Se supone que la onda reflejada en la anomalía 20 es circular. De acuerdo con ello, se definen tres círculos con un centro común en la posición de la anomalía 20 (x_p, y_p) utilizando la Ec. (4).

$$\begin{cases} (x_{S1} - x_p)^2 + (y_{S1} - y_p)^2 = R_{S1}^2 \\ (x_{S2} - x_p)^2 + (y_{S2} - y_p)^2 = R_{S2}^2 \\ (x_{S3} - x_p)^2 + (y_{S3} - y_p)^2 = R_{S3}^2 \end{cases} \quad \text{Ec. (4)}$$

donde (x_{S1}, y_{S1}) , (x_{S2}, y_{S2}) , (x_{S3}, y_{S3}) son las coordenadas de los centros de los transductores de recepción 110R, y (x_p, y_p) son las coordenadas de la anomalía 20.

- 30 Sustituyendo la Ec. (2) en la Ec. (4), se tiene

$$\begin{cases} (x_{S1} - x_p)^2 + (y_{S1} - y_p)^2 = (R_1 - R_A)^2 \\ (x_{S2} - x_p)^2 + (y_{S2} - y_p)^2 = (R_2 - R_A)^2 \\ (x_{S3} - x_p)^2 + (y_{S3} - y_p)^2 = (R_3 - R_A)^2 \end{cases} \quad \text{Ec. (5)}$$

La Ec. (5) representa un sistema de tres ecuaciones no lineales con solo dos incógnitas, x_p e y_p (existe también la

variable R_A , pero esta variable depende de las incógnitas x_p e y_p). Como existen más ecuaciones que incógnitas, el sistema está sobredeterminado.

Así, pues, es evidente que puede utilizarse el conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 que tiene únicamente dos transductores 105 para proporcionar una posición de la anomalía 20, si bien semejante sistema puede no proporcionar una posición inequívoca en todos los casos, y la presente invención abarca tales disposiciones. Sin embargo, se prefiere utilizar tres o más transductores 105 para garantizar una determinación inequívoca de la posición de la anomalía, y para proporcionar un sistema sobredeterminado que proporcione una precisión aumentada a la hora de determinar la posición de la anomalía 20.

Pueden emplearse técnicas de optimización para resolver sistemas sobredeterminados. Por ejemplo, puede obtenerse una solución de mínimos cuadrados del sistema sobredeterminado minimizando la siguiente ecuación funcional:

$$F = \left[(x_{s1} - x_p)^2 + (y_{s1} - y_p)^2 - (R_1 - R_A)^2 \right]^2 + \left[(x_{s2} - x_p)^2 + (y_{s2} - y_p)^2 - (R_2 - R_A)^2 \right]^2 + \left[(x_{s3} - x_p)^2 + (y_{s3} - y_p)^2 - (R_3 - R_A)^2 \right]^2$$

Ec. (6)

La solución para (x_p, y_p) , es decir, la posición de la anomalía 20 en la estructura 10, se obtiene numéricamente y se identifica de esta manera.

Se apreciará de las ecuaciones anteriores que no hay necesidad de que cada transductor 110 esté alineado en una dirección diferente. Así, con este método, dos o más transductores 110 pueden estar alineados, es decir, sus ejes longitudinales y transversales pueden extenderse paralelos.

Con la posición de la anomalía 20 que se acaba de encontrar por la etapa 860 de la Figura 8, el método prosigue con la etapa 870, en la que se realiza una comprobación para asegurarse de que se han tratado todas las anomalías (y el bucle 875 hace posible que sean tratadas otras anomalías adicionales). Una vez que se han tratado todas las anomalías, el método prosigue con la etapa 880, en la que las anomalías son notificadas, tal y como se describió anteriormente para la etapa 780. El método puede entonces cerrar un bucle de vuelta al inicio a través del camino 890.

A continuación se describirá un segundo método para hacer funcionar un sistema de supervisión de la salud estructural 100, con referencia a las Figuras 12 a 14. En esta realización, la estructura 10 que se ha de supervisar está dotada de dos o más conjuntos geoméricamente ordenados 105 de transductores 110. Puede utilizarse, por ejemplo, una disposición de dos conjuntos geoméricamente ordenados 105 de transductores 110 como la que se ha mostrado en la Figura 3.

La Figura 12 muestra el método de funcionamiento e incluye muchas de las etapas ya descritas en relación con la Figura 8. El método comienza en la etapa 1205 y prosigue, a continuación, por las etapas 1210a, 1215a, 1220a, 1225a, 1230a, 1235a y 1240a. Como estas etapas se corresponden con las etapas 810, 815, 829, 825, 830, 835 y 840 de la Figura 8, solo serán brevemente resumidas de nuevo.

En la etapa 1210a, se excita una onda elástica utilizando un primer conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110. Las señales de supervisión son captadas, tratadas previamente, diferenciadas y comparadas con un umbral para identificar anomalías 20 en la etapa 1240a. En la etapa 1255a, se considera, por turnos, cada anomalía 20 identificada y se determina la dirección desde el primer conjunto geoméricamente ordenado 105 hacia la anomalía 20. El modo como se lleva esto a cabo se describe más adelante con referencia a las Figuras 13 y 14.

Una vez determinadas las anomalías 20 y sus direcciones desde el primer conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores, el método prosigue por las etapas 1210b a 1255b. Estas etapas repiten las etapas 1210a a 1255a, pero con respecto a un segundo conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110. En consecuencia, se identifican las anomalías 20 y se determinan sus direcciones desde el segundo conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110.

Tal y como se indica por las flechas el línea discontinua 1256, el método puede repetir las etapas 1210 a 1255 para conjuntos geoméricamente ordenados 105 adicionales de transductores 110 (de tal manera que se obtienen tres o más conjuntos de datos de distancias a las anomalías identificadas 10).

Si bien se ha mostrado que cada iteración de las etapas 1210 a 1255 para cada conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 se produce secuencialmente en la Figura 12, pueden solaparse o tener lugar una o más iteraciones en paralelo. Por ejemplo, las etapas 1210b y siguientes pueden llevarse a efecto una vez que se la completado la etapa 1220a, de tal manera que las etapas de excitación de ondas y de captación de señales de supervisión se producen de forma secuencial para cada iteración, pero se solapan con las etapas de tratamiento de datos de iteraciones precedentes.

Una vez reunidos todos los datos, ya sea utilizando dos conjuntos geoméricamente ordenados 105, según se indica por la flecha 1258, ya sea utilizando más de dos conjuntos geoméricamente ordenados, según se indica por las flechas 1256, el método prosigue con la etapa 1265, en la que las direcciones obtenidas por cada conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 para cada anomalía 20 identificada, se utilizan para determinar las posiciones de esas anomalías 20. Esta etapa 1265 se describe con mayor detalle más adelante, pero se basa esencialmente en la intersección del par de direcciones hacia cada anomalía 20 identificada.

Una vez que se han determinado las posiciones de las anomalías 20, se informa de las anomalías en la etapa 1280. Esta etapa se corresponde con la etapa 880 de la Figura 8 y, por tanto, no se describirá de nuevo. El método puede repetirse, según se indica por la flecha 1290 y ya se ha descrito con referencia al elemento correspondiente 890 de la Figura 8.

Las etapas 1255 de determinación de la dirección a cada anomalía 20 se explicarán a continuación con referencia a la Figura 13.

Una estructura 10 que se ha de supervisar se dota de dos conjuntos geoméricamente ordenados 105A, B de transductores 110, de tal modo que cada conjunto geoméricamente ordenado 105A, B comprende tres transductores de recepción 110A_{R1-3}, 110B_{R1-3}, así como un transductor de transmisión 110A_T, 110B_T. Se ha mostrado una anomalía 20, conjuntamente con una onda elástica 40 reflejada en la anomalía 20 hacia el primer conjunto geoméricamente ordenado 105A.

El transductor 110A_{R1} se ha mostrado con mayor detalle en la Figura 14, de tal manera que se indican los ejes longitudinales y transversales, conjuntamente con la distribución de esfuerzos en el transductor 110A_{R1}. La onda producida por el transductor de transmisión 110A_T rebota en la anomalía 20 y genera unas componentes de esfuerzos longitudinal y trasversal, ε_1 y ε_2 , respectivamente en cada uno de los transductores de recepción 110A_{R1-3}. Los componentes de esfuerzos ε_1 y ε_2 se definen como:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x \cdot \cos^2 \Delta \quad \text{Ec. (7)}$$

y

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_x \cdot \sin^2 \Delta \quad \text{Ec. (8)}$$

donde Δ es el ángulo comprendido entre el eje longitudinal del transductor 110A_{R1} y la dirección de la onda entrante 40, es decir, $\beta - \alpha$ en la Figura 14.

La señal que se genera en los transductores de recepción 110A_{R1-3} puede computarse como

$$\begin{aligned} V^1 &= S_1 \varepsilon_1^1 + S_2 \varepsilon_2^1 \\ V^2 &= S_1 \varepsilon_1^2 + S_2 \varepsilon_2^2 \\ V^3 &= S_1 \varepsilon_1^3 + S_2 \varepsilon_2^3 \end{aligned} \quad \text{Ec. (9)}$$

donde los factores de sensibilidad S_1 y S_2 dependen de la relación entre la longitud del transductor y la longitud de onda de la onda elástica, así como de la orientación relativa del transductor de recepción 110A_{R1-3} y la dirección de incidencia de la onda elástica.

Nótese que

$$\frac{V}{S_1} = \varepsilon_1 + K_T \varepsilon_2 \quad \text{Ec. (10)}$$

donde la relación de sensibilidad transversal K_T se define como

$$K_T = \frac{S_1}{S_2} = \frac{l(d_{31}v_{31}E_2 + d_{32}E_2)\text{sen}(kb/2)}{b(d_{31}E_1 + d_{32}v_{12}E_2)\text{sen}(kl/2)} \quad \text{Ec. (11)}$$

donde l y b son, respectivamente, la longitud y la anchura de los transductores de recepción 110A_{R1-3}, k es el número de onda, d_{31} y d_{32} son las constantes piezoeléctricas de los transductores de recepción 110A_{R1-3}, y E_1 y E_2 son los módulos de Young a lo largo de las direcciones longitudinal y transversal.

Las componentes de esfuerzos en un plano en el centro del conjunto geoméricamente ordenado pueden ser computadas utilizando las relaciones clásicas deducidas para rosetas de galgas extensiométricas (véase la divulgación Mechanics of Materials [Mecánica de materiales], por R. C. Hibbeler, publicada por Prentice Hall, Inc. en 1997). La ecuación de transformación de esfuerzos para determinar el estado de esfuerzo en un sistema de coordenadas $x'y'$ rotado un ángulo α con respecto a un eje de referencia xy , es:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x'} &= \varepsilon_x \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \text{sen}^2 \alpha + \gamma_{xy} \text{sen} \alpha \cos \alpha \\ \varepsilon_{y'} &= \varepsilon_x \text{sen}^2 \alpha + \varepsilon_y \cos^2 \alpha - \gamma_{xy} \text{sen} \alpha \cos \alpha \end{aligned} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$\gamma_{x'y'} = 2(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \text{sen} \alpha \cos \alpha + \gamma_{xy}(\cos^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha)$$

De una manera similar, las componentes de esfuerzos en un plano pueden determinarse a partir de la respuesta de los tres transductores de recepción 110A_{R1-3}:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{V^1}{S_1} \\ \frac{V^2}{S_2} \\ \frac{V^3}{S_3} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (13)}$$

donde la matriz de transformación puede escribirse como:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_1 + K_T \text{sen}^2 \alpha_1 & \text{sen}^2 \alpha_1 + K_T \cos^2 \alpha_1 & (1 - K_T) \text{sen} \alpha_1 \cos \alpha_1 \\ \cos^2 \alpha_2 + K_T \text{sen}^2 \alpha_2 & \text{sen}^2 \alpha_2 + K_T \cos^2 \alpha_2 & (1 - K_T) \text{sen} \alpha_2 \cos \alpha_2 \\ \cos^2 \alpha_3 + K_T \text{sen}^2 \alpha_3 & \text{sen}^2 \alpha_3 + K_T \cos^2 \alpha_3 & (1 - K_T) \text{sen} \alpha_3 \cos \alpha_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (14)}$$

La orientación de una perpendicular al frente de ondas elástico antisimétrico 40 (el ángulo de esfuerzo principal de la onda) puede definirse utilizando otra relación conocida por la teoría de galgas extensiométricas:

$$\tan 2\beta_A = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad \text{Ec. (15)}$$

Nótese que las señales recogidas en un único conjunto geoméricamente ordenado 105 son solo suficientes para determinar la dirección β hacia la anomalía 20, pero no su posición. En consecuencia, se utilizan uno o más conjuntos geoméricamente ordenados 105 adicionales para encontrar la posición exacta de la anomalía. La posición (y_D , x_D) de la anomalía puede computarse utilizando un sistema de dos ecuaciones algebraicas lineales (Matt, H. M. y Lanza di Scalea, F., 2007, "Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures", Smart Mater. Struct., Vol. 16, págs. 1489-1499:

$$y_D = (x_D - x_1) \tan(\beta_1) + y_1 \quad \text{Ec. (16)}$$

$$y_D = (x_D - x_2) \tan(\beta_2) + y_2 \quad \text{Ec. (17)}$$

donde x_1 , y_1 y x_2 , y_2 son las coordenadas de los transductores de transmisión 110A_T y 110B_T.

En el caso de que el método de la Figura 12 se lleve a cabo en un componente 10 que tiene dos o más anomalías 20, es posible que puedan detectarse "falsas" anomalías. Esto es debido a que el método determina direcciones desde cada conjunto geoméricamente ordenado 105 de transductores 110 hacia cada anomalía. En consecuencia, para cada conjunto geoméricamente ordenado 105, puede haber un cierto número de "direcciones" que se irradian desde ese conjunto geoméricamente ordenado 105. Cualquiera "dirección" desde el conjunto geoméricamente ordenado 105 puede cortar más de una "dirección" que se irradia desde otro conjunto geoméricamente ordenado 105, y el método anterior identifica todas las intersecciones como una anomalía 20, mientras que tan solo una única intersección de cada "dirección" será una anomalía 20.

Pueden utilizarse mediciones de tiempo de vuelo para afrontar esto. Por ejemplo, una vez determinadas las posiciones de todas las intersecciones, puede utilizarse un transductor de transmisión 110T para enviar o emitir una onda elástica, y las reflexiones son detectadas por un receptor de recepción 110R. Las anomalías 20 pueden detectarse en la señal recibida, y se determinan los tiempos de vuelo. Estos pueden compararse entonces con las intersecciones identificadas, y las intersecciones que no tienen ninguna medición de tiempo de vuelo en correspondencia pueden ser descartadas como "falsas" anomalías.

Los dos métodos de la Figura 12 producen buenos resultados. La decisión por lo que respecta a la selección del método depende de factores tales como el espacio disponible en la estructura 1, el tipo de estructura 10 y el presupuesto de que se dispone.

Un transductor constituido por tres piezoelementos no direccionales (por ejemplo, discos) será suficiente para detectar y localizar daños en estructuras simples tales como paneles de cubierta externa de aluminio utilizando métodos de tiempo de vuelo como los que se han descrito anteriormente. Una implementación más complicada, por ejemplo, un juego de al menos dos conjuntos geoméricamente ordenados 105, puede comportarse mejor para estructuras complejas 10 tales como paneles de material compuesto de carbono curvados con un amortiguamiento estructural significativo.

La precisión de las mediciones dependerá, entre otras cosas, de la precisión de la fabricación del transductor. Un breve estudio de las ecuaciones 13 y 14 revela que los conjuntos geoméricamente ordenados 105 que se utilizan para el método de la Figura 12 no deben contener transductores de recepción 110R paralelos. Cualquier paralelismo tendrá como resultado una matriz de transformación T singular (véase la ecuación 14). Suponiendo que este no es el caso y que cada uno de los transductores de recepción 110R se ha fijado en un ángulo diferente, su orientación relativa y la posible dispersión en su geometría importan poco, siempre y cuando la geometría sea conocida.

La Figura 15 muestra una aeronave 50 equipada con un sistema de supervisión de la salud estructural 100. El sistema de supervisión de la salud estructural 100 comprende diversos conjuntos geoméricamente ordenados 105 compuestos por uno o más, y/o al menos tres, transductores 110 situados a lo largo y ancho de la aeronave 50. Los conjuntos geoméricamente ordenados 105 de transductores 110 se han proporcionado en estructuras 10 que incluyen las alas 52, tal como se muestra por la referencia 105₅₂, el fuselaje 54, tal como se muestra por la referencia 105₅₄, y en la cola 56, tal y como se muestra por la referencia 105₅₆.

Cada conjunto geoméricamente ordenado 105 proporciona señales que se utilizan para identificar anomalías dentro de la estructura 10 asociada. Puede haberse proporcionado un procesador central 120 que hace funcionar todos los conjuntos geoméricamente ordenados 105 o los grupos de los conjuntos geoméricamente ordenados 105, o bien cada conjunto geoméricamente ordenado 105 puede tener un procesador 120 dedicado.

Los expertos en la técnica apreciarán que pueden realizarse modificaciones en las realizaciones anteriormente descritas sin apartarse del ámbito de la invención, que se define por las reivindicaciones que se acompañan.

Por ejemplo, las Figuras 4A a 4D muestran cuatro disposiciones de transductores proporcionadas a modo de ejemplo. Son posibles muchas disposiciones diferentes en las que los ejes longitudinales y transversales de los tres transductores de recepción 110R pueden estar alineados o no. Además, el número de transductores 110 del conjunto geoméricamente ordenado 105 puede modificarse de uno o a un número cualquiera. Los transductores 110 pueden estar uniformemente separados y/o girados unos con respecto a otros para proporcionar configuraciones regulares, si bien son posibles disposiciones irregulares en las que los transductores 110 no están uniformemente separados y/o girados unos con respecto a otros.

No es necesario proporcionar un transductor de transmisión 110T independiente, puesto que pueden utilizarse uno o más de los transductores de recepción 110R para lanzar la onda elástica al seno de la estructura 10. Es más, cabe la posibilidad de utilizar dos o más transductores de transmisión 110T independientes.

REIVINDICACIONES

1. Un método para evaluar daños (20) dentro de una estructura (10) utilizando un sistema de supervisión de la salud estructural (100) que comprende un primer conjunto (105A) geoméricamente ordenado de al menos tres receptores (110A_{R1}, 110A_{R2}, 110A_{R3}) dispuestos en contacto operativo con la estructura y un transmisor (110A_T) dispuesto en contacto operativo con la estructura, y un segundo conjunto (105B) geoméricamente ordenado de al menos tres receptores (110B_{R1}, 110B_{R2}, 110B_{R3}) dispuestos en contacto operativo con la estructura y un transmisor (110B_T) dispuesto en contacto operativo con la estructura, en donde los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo están separados uno del otro, comprendiendo el método:
 - propagar una onda elástica (30) a través de la estructura utilizando el transmisor del primer conjunto geoméricamente ordenado;
 - recoger señales de supervisión desde los al menos tres receptores con el fin de supervisar las reflexiones (40) de la onda elástica en al menos una anomalía (20) dentro de la estructura;
 - propagar una onda elástica (30) a través de la estructura utilizando el transmisor del segundo conjunto geoméricamente ordenado;
 - recoger señales de supervisión desde los al menos tres receptores del segundo conjunto geoméricamente ordenado con el fin de supervisar las reflexiones (40) de la onda elástica desde la al menos una anomalía dentro de la estructura, y **caracterizado por**
 - analizar las señales de supervisión para identificar la al menos una anomalía y para determinar una dirección (β_A , β_B) desde los respectivos conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo hacia la al menos una anomalía, y
 - utilizar las direcciones hacia la anomalía desde cada uno de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo en combinación con posiciones conocidas de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo en la estructura para determinar la posición de la anomalía en la estructura.
2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde en cada uno de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo, cada uno de los receptores es un transductor piezoeléctrico con un eje longitudinal y un eje transversal, y en donde los receptores están dispuestos de tal manera que no hay ningún par de receptores que tengan sus ejes longitudinales alineados.
3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en donde, para cada receptor, las señales de supervisión son analizadas para determinar componentes de esfuerzo (ϵ_1 , ϵ_2) longitudinales y transversales que se usan en combinación con orientaciones conocidas de los receptores dentro de cada conjunto geoméricamente ordenado para determinar la dirección hacia la anomalía.
4. El método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, en donde analizar las señales de supervisión comprende llevar a cabo una operación de diferenciación en virtud de la cual, para cada receptor, se sustrae una señal de referencia de las señales de supervisión recogidas por ese receptor, y en donde las señales de diferenciación resultantes se utilizan para identificar la al menos una anomalía dentro de la estructura.
5. El método de acuerdo con la reivindicación 4, que comprende recoger señales de referencia desde la estructura para cada receptor, opcionalmente después de que la estructura se haya considerado lista para su uso operativo.
6. El método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, en donde la estructura comprende al menos dos anomalías, y el método comprende:
 - analizar las señales de supervisión para identificar cada una de las al menos dos anomalías y para determinar una dirección desde los respectivos conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo hacia cada una de las al menos dos anomalías;
 - utilizar un transmisor (110A_T, 110B_T) para generar una onda elástica y detectar reflexiones de la onda elástica en una señal recibida que recibe un receptor (110A_{R1-R3}, 110B_{R1-R3});
 - detectar cada una de las al menos dos anomalías en la señal recibida;
 - determinar tiempo de vuelos hacia cada una de las al menos dos anomalías;
 - comparar el tiempo de vuelos determinado con las intersecciones identificadas; y
 - descartar las anomalías potenciales con las intersecciones que no tienen coincidencia con el tiempo de vuelo.
7. Un sistema de supervisión de la salud estructural (100), para supervisar una estructura (10), que comprende:
 - un primer conjunto (105A) geoméricamente ordenado que incluye al menos tres receptores (110A_{R1}, 110A_{R2}, 110A_{R3}) en contacto operativo con la estructura y un transmisor (110A_T) en contacto operativo con la estructura
 - un segundo conjunto (105B) geoméricamente ordenado que incluye al menos tres receptores (110B_{R1}, 110B_{R2}, 110B_{R3}) en contacto operativo con la estructura y un transmisor (110B_T) en contacto operativo con la estructura, y en donde:

el segundo conjunto geoméricamente ordenado está separado del primer conjunto geoméricamente ordenado;

en donde el transmisor del primer conjunto geoméricamente ordenado está configurado para excitar una onda elástica (30) para que se propague a través de la estructura, y un procesador (120) está acoplado operativamente a los receptores del primer conjunto geoméricamente ordenado con el fin de recoger señales de supervisión desde cada uno de los al menos tres receptores;

el transmisor del segundo conjunto geoméricamente ordenado está configurado para excitar una onda elástica (30) para que se propague a través de la estructura, y el procesador está acoplado operativamente a los receptores del segundo conjunto geoméricamente ordenado con el fin de recoger señales de supervisión desde cada uno de los al menos tres receptores; y

caracterizado por que el procesador está configurado:

para analizar las señales de supervisión con el fin de identificar al menos una anomalía dentro de la estructura; para determinar una dirección desde los respectivos conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo hacia la al menos una anomalía; y

para utilizar las direcciones hacia la anomalía desde cada uno de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo en combinación con posiciones conocidas de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo en la estructura con el fin de determinar la posición de la anomalía en la estructura.

8. El sistema de supervisión de la salud estructural de acuerdo con la reivindicación 7, en donde en cada uno de los conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo, cada uno de los receptores es un transductor piezoeléctrico con un eje longitudinal y un eje transversal, y en donde los receptores están dispuestos de tal manera que no hay ningún par de receptores que tengan ejes longitudinales alineados.

9. El sistema de supervisión de la salud estructural de acuerdo con la reivindicación 8, en donde el procesador está configurado para, para cada receptor, analizar las señales de supervisión para determinar componentes de esfuerzo (ϵ_1 , ϵ_2) longitudinales y transversales que se usan en combinación con orientaciones conocidas de los receptores dentro de cada conjunto geoméricamente ordenado para determinar la dirección de la anomalía.

10. El sistema de supervisión de la salud estructural de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, en donde el procesador está configurado para analizar las señales de supervisión realizando una operación de diferenciación por la cual, para cada receptor, se sustrae una señal de referencia de las señales de supervisión recogidas por ese receptor, y en donde las señales de diferenciación resultantes se usan para identificar la al menos una anomalía dentro de la estructura.

11. El sistema de supervisión de la salud estructural de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, en donde la estructura comprende al menos dos anomalías, y el procesador está configurado:

para analizar las señales de supervisión para identificar cada una de las al menos dos anomalías y para determinar una dirección desde los respectivos conjuntos geoméricamente ordenados primero y segundo para cada una de las al menos dos anomalías;

para identificar todas las intersecciones de las direcciones que irradian desde el primer conjunto geoméricamente ordenado con las direcciones irradiando desde el segundo conjunto geoméricamente ordenado como anomalías potenciales;

para utilizar un transmisor (110A_T, 110B_T) para generar una onda elástica (30) y para detectar reflexiones de la onda elástica en una señal recibida que recibe un receptor (110_{R1-R3}, 110_{R1-R3});

para detectar cada una de las al menos dos anomalías en la señal recibida;

para determinar el tiempo de vuelos hacia cada una de las al menos dos anomalías;

para comparar el tiempo de vuelos determinado con las intersecciones identificadas; y

para descartar las anomalías potenciales con las intersecciones que no tienen coincidencia con el tiempo de vuelo.

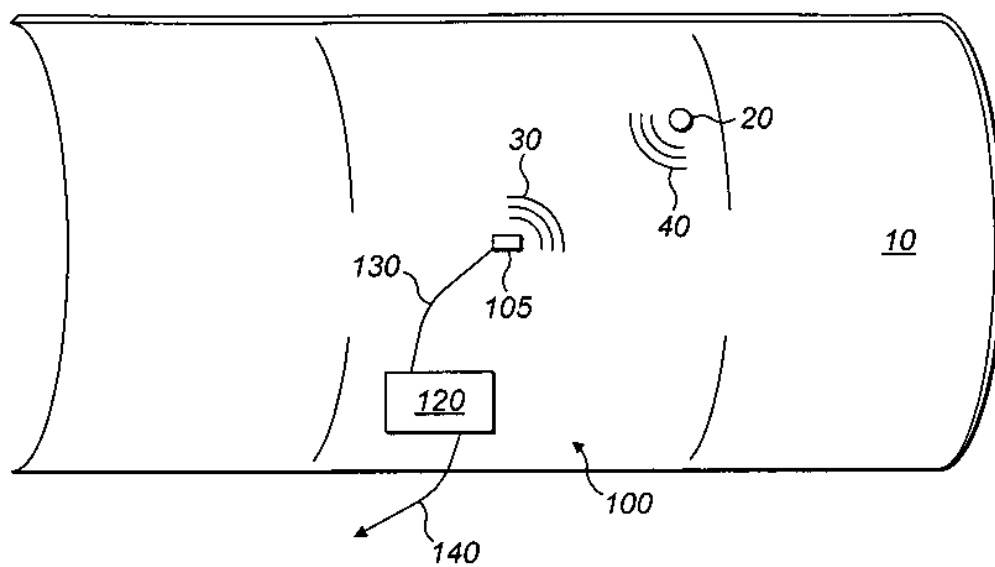


FIG. 1

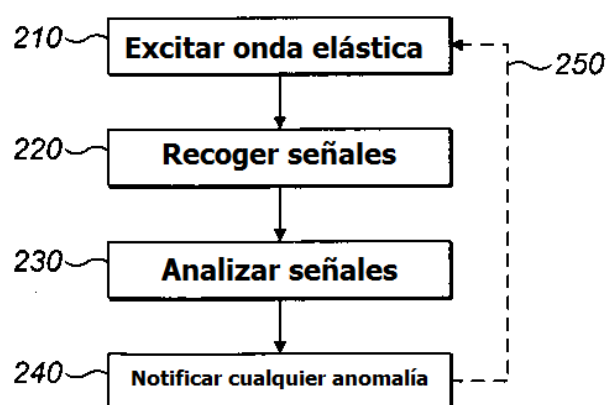


FIG. 2

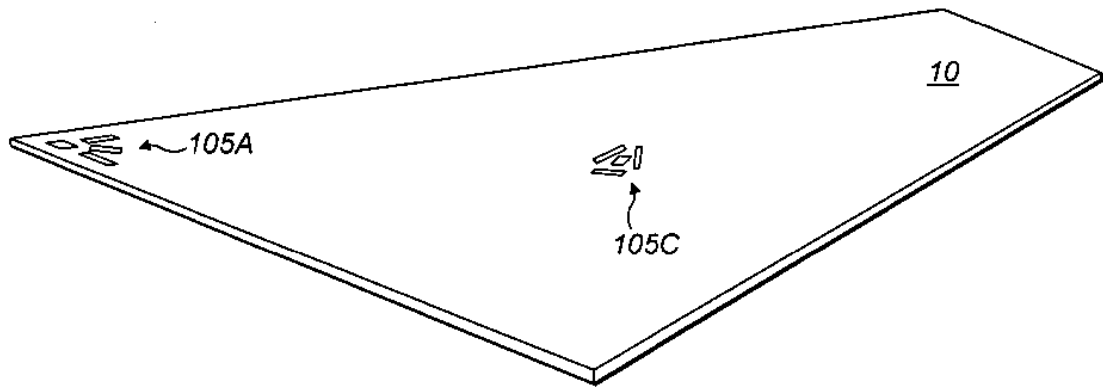


FIG. 3

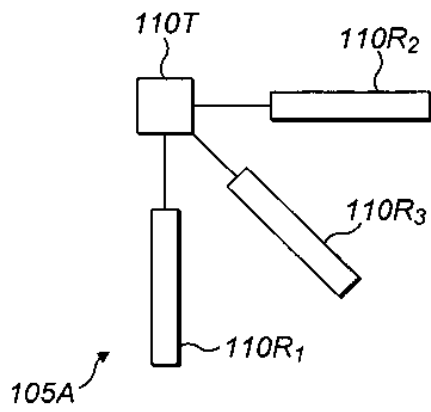


FIG. 4A

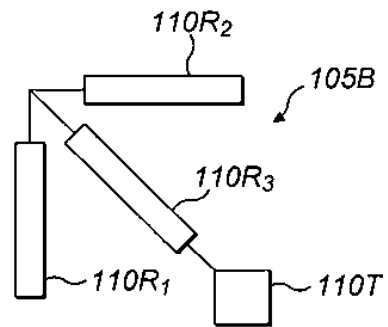


FIG. 4B

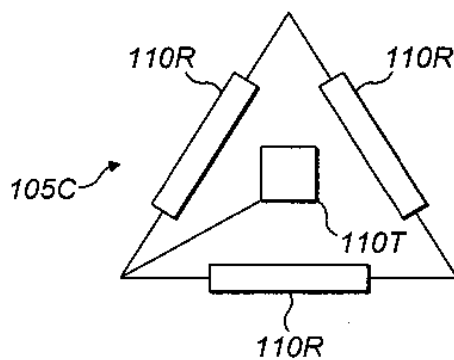


FIG. 4C

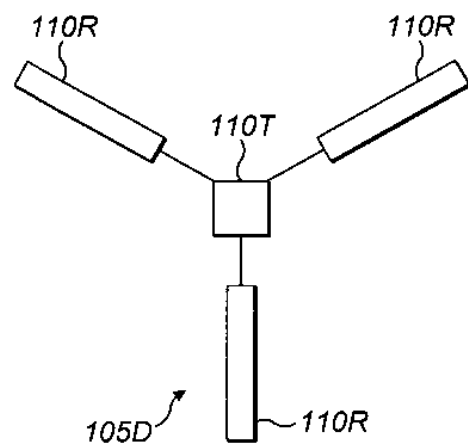


FIG. 4D

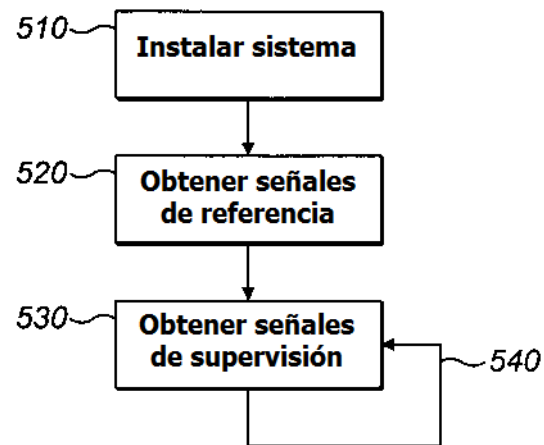


FIG. 5

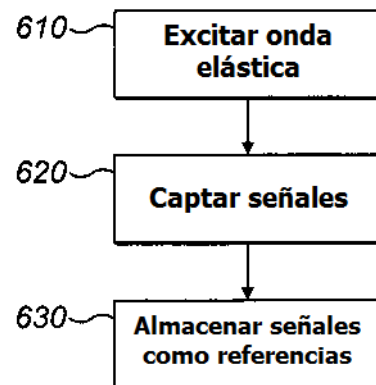


FIG. 6

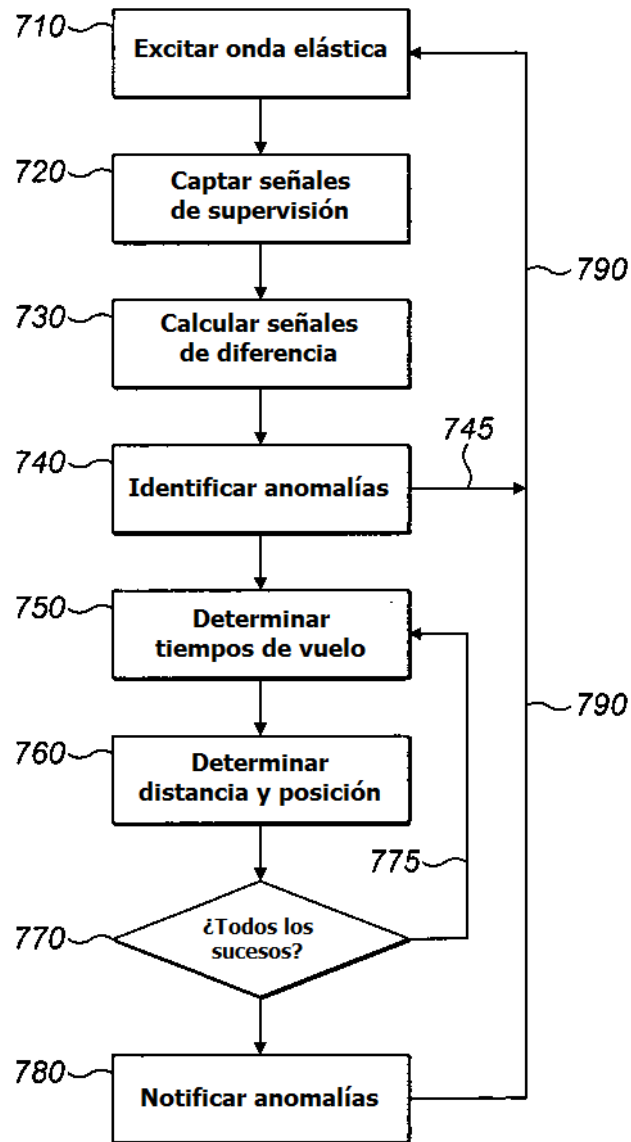


FIG. 7

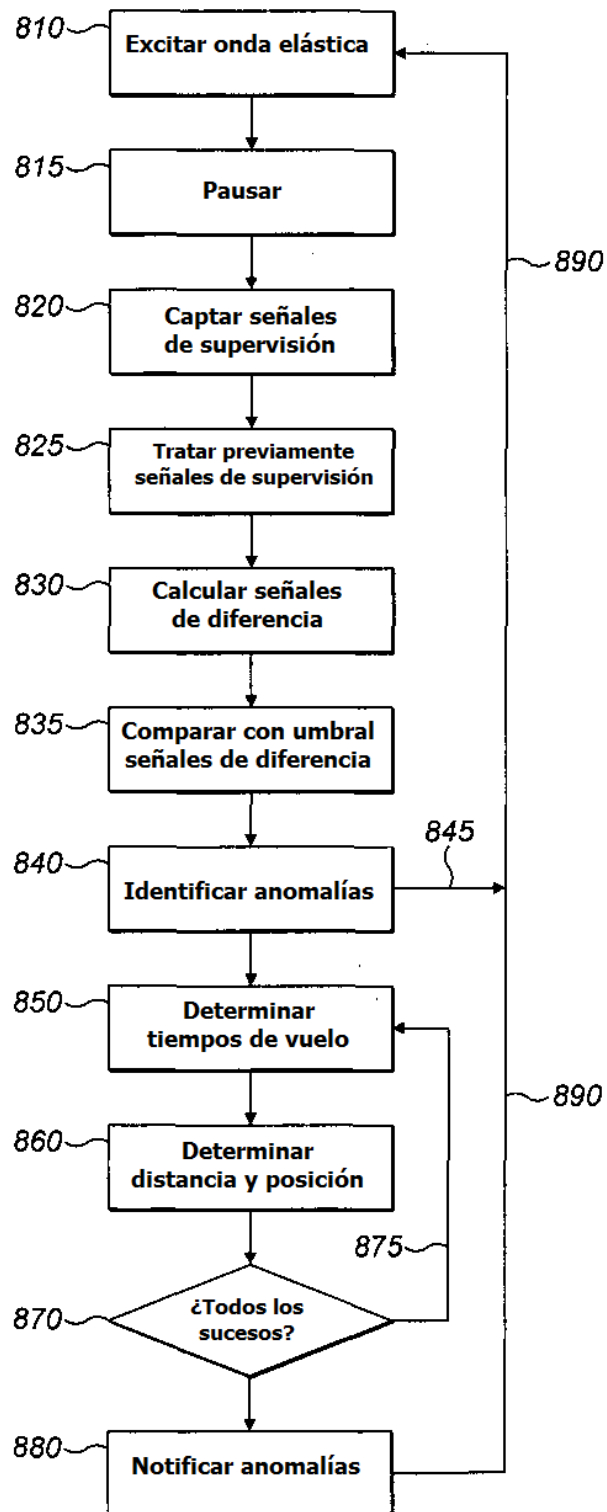


FIG. 8

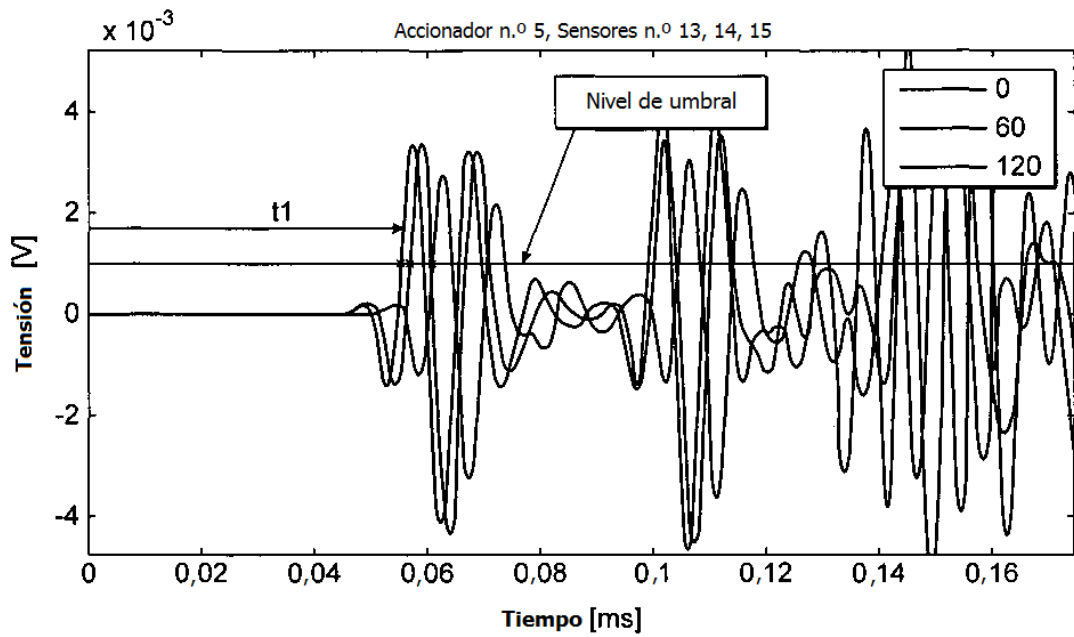


FIG. 9

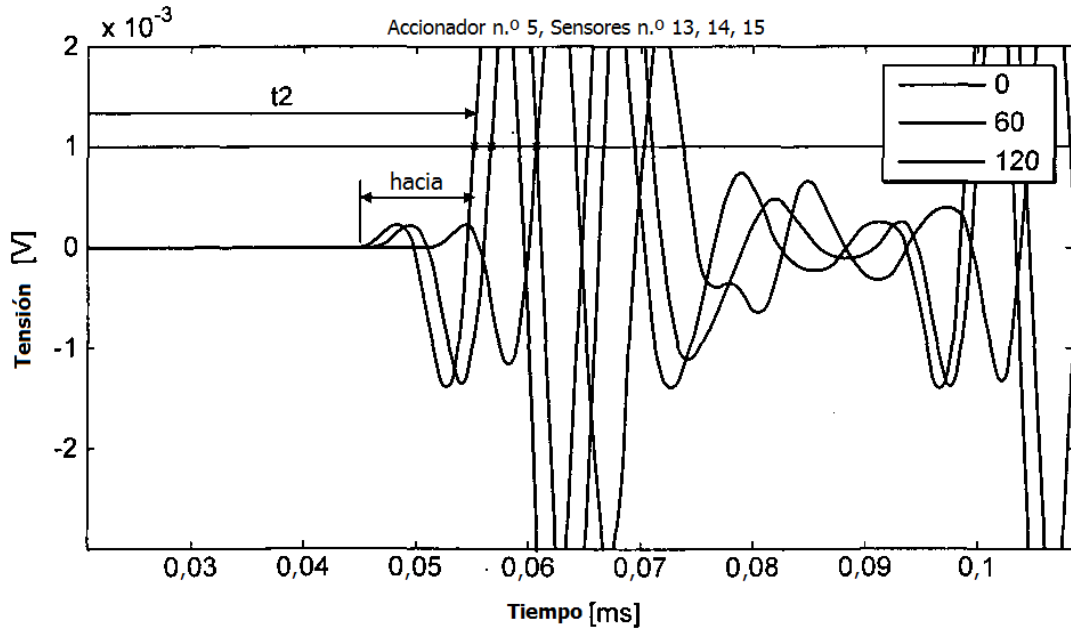
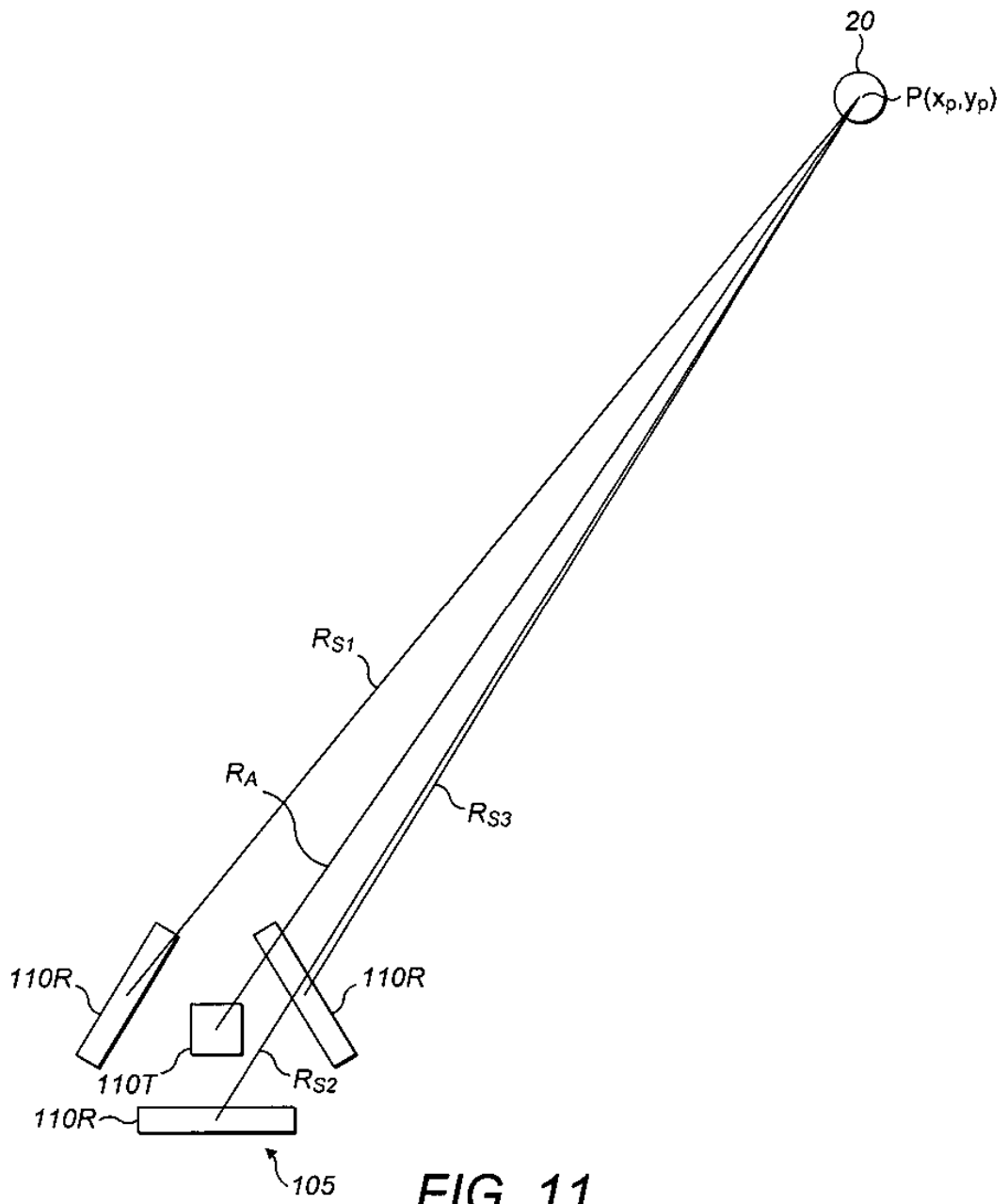
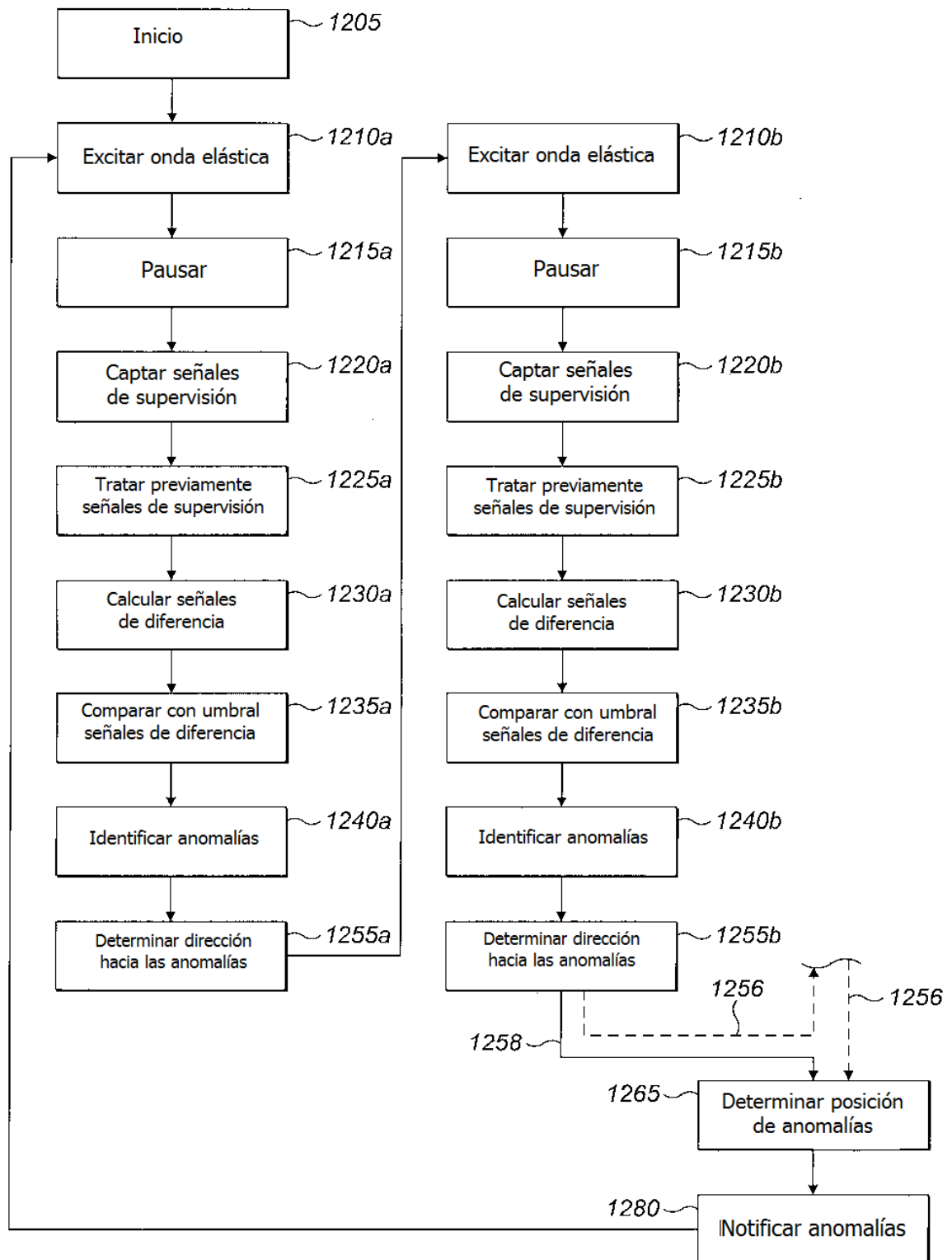


FIG. 10





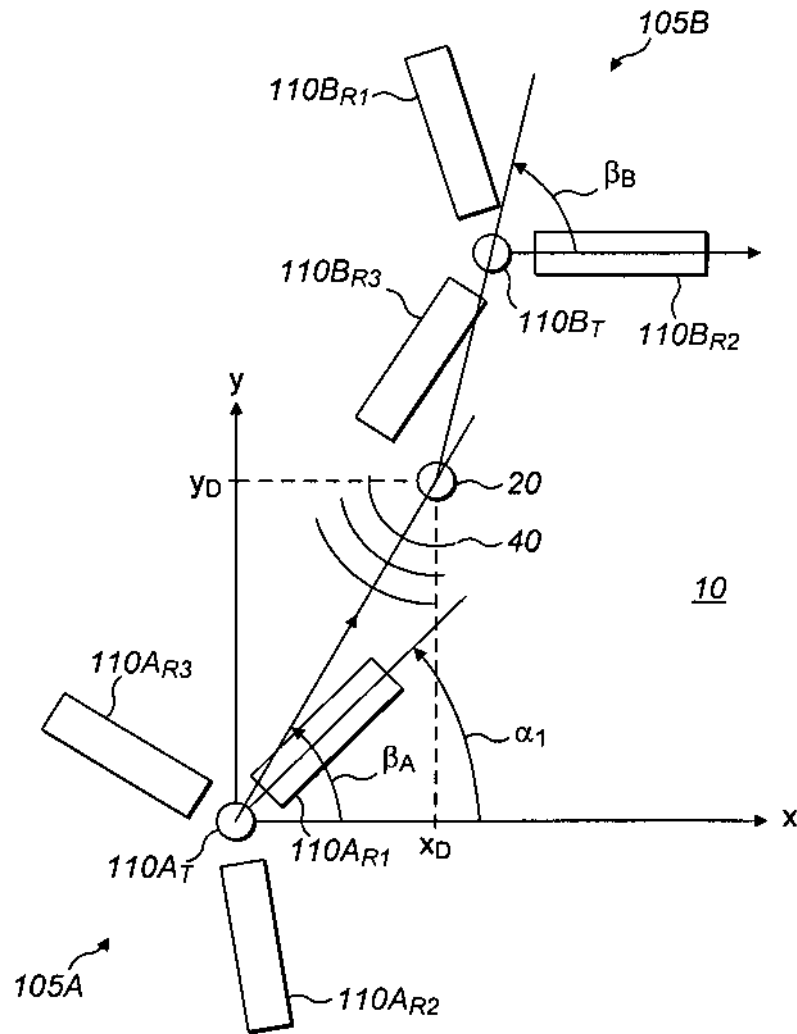


FIG. 13

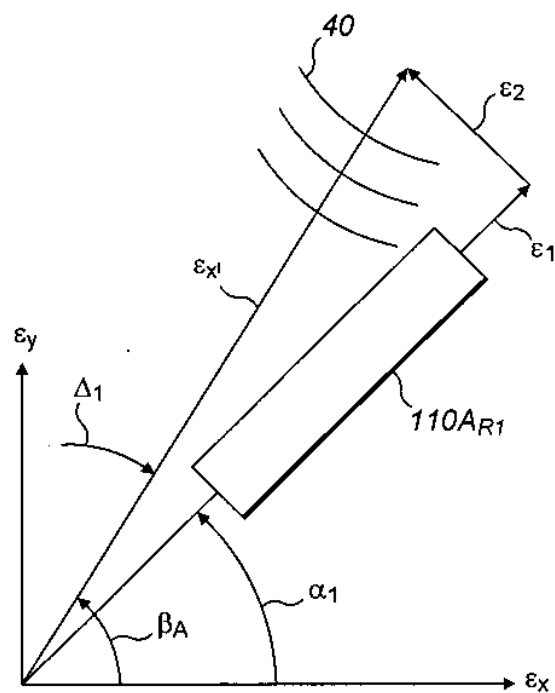


FIG. 14

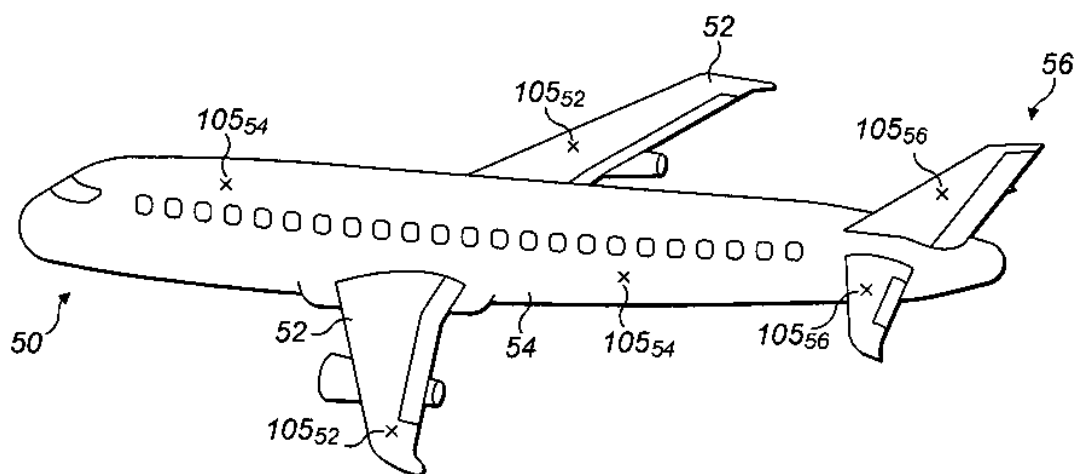


FIG. 15