

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 750 800**

51 Int. Cl.:

**G01N 29/04** (2006.01)

**B06B 1/06** (2006.01)

**G01N 29/34** (2006.01)

**G01N 29/42** (2006.01)

**G01N 29/44** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.06.2018 E 18176674 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.08.2019 EP 3418736**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para la medición de banda ancha con transductores de ultrasonidos aéreos de elementos múltiples**

30 Prioridad:

**23.06.2017 EP 17177656**

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

**27.03.2020**

73 Titular/es:

**SONOTEC ULTRASCHALLSENSORIK HALLE  
GMBH (100.0%)  
Nauendorfer Straße 2  
06112 Halle / Saale, DE**

72 Inventor/es:

**BODI, ANDREAS;  
STEINHAUSEN, RALF;  
KIEL, MARIO y  
GAUTZSCH, TOBIAS**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

ES 2 750 800 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para la medición de banda ancha con transductores de ultrasonidos aéreos de elementos múltiples

5

**Campo de la invención**

La presente invención se ubica en el campo de las pruebas no destructivas, en particular el campo de las pruebas mediante ultrasonido, y se refiere a un sistema de ultrasonido aéreo y un procedimiento para la prueba ultrasónica acoplada por aire. La presente invención se refiere además al uso del procedimiento o del sistema de ultrasonido aéreo para la caracterización de superficies y/o para la prueba de materiales compuestos (composites), uniones adhesivas y compuestos de materiales para detectar errores, tales como inclusiones de aire, deslaminación, defectos de adhesión, impurezas, canales, grietas y *kissing bonds* (defectos de unión). Además, la presente invención proporciona un transductor ultrasónico de elementos múltiples y productos de programa de ordenador para controlar el transductor ultrasónico de elementos múltiples y la evaluación de mediciones de ultrasonido aéreo.

10

15

**Antecedentes de la invención**

Para la prueba de uniones adhesivas de composite, debido al gran número de defectos que se presentan (inclusiones de aire, deslaminaciones, defectos de adhesión, impurezas, canales, grietas, *kissing bonds*) es necesario emplear diferentes procedimientos de medición. Esto aumenta sustancialmente los costos de las pruebas. Además, hasta ahora no se conoce ningún procedimiento que pueda detectar de manera segura los defectos de unión conocidos como *kissing bonds* en materiales compuestos reforzados con fibra. Se conocen procedimientos para el ensayo de compuestos de metal, pero estos procedimientos no se pueden transferir a los materiales compuestos de fibras.

20

25

Debido al gran número de efectos que se presentan, las exigencias planteadas al trabajo de medición son múltiples. A causa de las diferentes extensiones laterales y axiales de los defectos, así como el diferente comportamiento de atenuación, es necesario efectuar las mediciones con la mayor anchura de banda posible. Las anchuras de banda, tales como las que se emplean en la técnica de inmersión o en la medición con la técnica de contacto, actualmente no son aplicables en el ámbito de las pruebas ultrasónicas aéreas. Mientras que en las mediciones la técnica de contacto o la técnica de inmersión se suelen usar anchuras de banda de 80-100 %, en el ámbito de las pruebas ultrasónicas aéreas que trabaja con anchuras de banda por debajo de 30 %. Para poder detectar de manera segura los defectos descritos, sin embargo, estas anchuras de banda no son suficientes. Para poder detectar el gran número de defectos posibles, es necesario examinar la muestra o el objeto de ensayo con varias frecuencias. El gasto adicional generado por esto es sustancial y muchas veces lleva a que se descarte el procedimiento de ensayo.

30

35

Los usuarios se conforman con las desventajas asociadas a la técnica de inmersión y de contacto en lo referente a la contaminación del espécimen de ensayo con medios de acoplamiento o bien renuncian a la costosa prueba de superficie con ultrasonido.

40

Además, se conocen procedimientos que por medio de la excitación con frecuencias y amplitudes variadas (sweep, chirp) tratan de aumentar la anchura de banda de los transductores de ultrasonido. Sin embargo, estos procedimientos presentan la ventaja sustancial de que además de una clara limitación en el aumento de la anchura de banda, la longitud de los impulsos se incrementa de forma múltiple. En numerosas aplicaciones de medición, sin embargo, se requiere un impulso tan corto como sea posible. La medición con impulsos individuales, como es el caso en la técnica de contacto y de inmersión, actualmente sólo tiene pocos campos de aplicación en la medición ultrasónica aérea, debido a la elevada atenuación del ultrasonido.

45

El documento DE 102013110900 A1 describe un transductor de ultrasonido para la prueba acoplada por aire mediante el uso de hojas de electreto como material activo, por una parte para la generación de sonido y por otra parte para la adaptación acústica al medio de transmisión aire. Sin embargo, el documento DE 102013110900 A1 no desvela ninguna posibilidad de aumentar la anchura de banda a través de un control diferencial específico de la frecuencia de diferentes elementos de un transductor de ultrasonido de elementos múltiples.

50

El documento US 2013/0294201 A1 desvela transductores de ultrasonido con una alta anchura de banda basados en piezocomposites (pMUT), que presentan dos electrodos, así como formaciones, que presentan una pluralidad de tales transductores de ultrasonido de banda ultraancha (formaciones pMUT). Este sistema ultrasónico se emplea predominantemente en el ámbito médico. Para controlar el primer electrodo, se usa una frecuencia de 15 MHz y para el segundo electrodo se usa una frecuencia en el alcance de 30-60 MHz. Sin embargo, estas frecuencias y la existencia de sólo 2 electrodos no son apropiados para pruebas ultrasónicas, en las que se usa aire como medio de acoplamiento. Adicionalmente, el documento US 2013/0294201 A1 desvela una formación de piezoelementos. Esto presenta la desventaja de que los elementos individuales se controlan con desplazamiento de fase. Además, no es posible lograr el aumento necesario de la anchura de banda de las frecuencias para la prueba ultrasónica de materiales de composite y otros compuestos para detectar defectos.

60

65

El documento EP 0 166 976 A1 desvela un sistema de transductor ultrasónico con dos transductores ultrasónicos, que presentan respectivamente una frecuencia media predeterminada diferentes entre sí y cuyos focos naturales se superponen. Los por lo menos dos transductores ultrasónicos se disponen conjuntamente sobre un cuerpo de soporte, en lo que el primer transductor ultrasónico tiene forma de cilindro y está rodeado por un segundo transductor ultrasónico cilíndrico hueco. A este respecto, la superficie de radiación de ambos transductores ultrasónicos se ubica en un mismo plano y los dos transductores ultrasónicos están separados acústicamente entre sí por medio de, por ejemplo, un intervalo de aire. Los por lo menos dos transductores ultrasónicos se controlan eléctricamente de forma separada entre sí. El documento EP 0 166 976 A1 se refieren general al problema de que muchos medios de transmisión, tales como, por ejemplo, los tejidos biológicos, amortiguan las señales ultrasónicas de manera muy intensa y en función de la frecuencia, por lo que tienen influencia sobre la altura de la frecuencia media y la anchura de banda de las señales ultrasónicas. Uno de los dos elementos transductores se puede dividir entonces en varios transductores parciales, conectados en paralelo entre sí. Los transductores parciales en ese caso no se disponen de forma anular unos alrededor de otros. El sistema de transductor ultrasónico propuesto en el documento EP 0 166 976 A1 ha de ser capaz de mejorar la anchura de banda y, por lo tanto, la calidad de la imagen, y en particular se ha de compensar el paso de frecuencia del medio de transmisión "tejido". La frecuencia media para el transductor ultrasónico cilíndrico es, por ejemplo, de 4 MHz, y la frecuencia media para el transductor ultrasónico cilíndrico hueco es, por ejemplo, de 2 MHz. La potencia acústica de los dos transductores ultrasónicos es, por ejemplo, de 130. Sin embargo, estas frecuencias, la existencia de tan sólo 2 electrodos y la potencia acústica de los dos transductores ultrasónicos, no son apropiadas para pruebas ultrasónicas, en las que se usa aire como medio de acoplamiento. En el citado documento EP 0 166 976 A1 no se encuentra ninguna indicación referente al uso del sistema ultrasónico en los ensayos ultrasónicos aéreos para detectar defectos de material.

El documento DE 199 28 765 A1 desvela una disposición de transductor ultrasónico y un procedimiento para la prueba ultrasónica. La disposición de transductor ultrasónico comprende por lo menos dos capas transductoras ubicadas consecutivamente, visto en la dirección de radiación, que se controlan de manera individual o combinadas en forma de grupo. A este respecto, por lo menos dos grupos se operan con frecuencias diferentes. La primera y la segunda frecuencia se pueden seleccionar bien sea mediante la selección de espesores apropiados de las capas de transductor o mediante el control conjunto de determinadas capas de transductor. El documento DE 199 28 765 A1 no desvela la disposición anular de los electrodos. Por lo tanto, no es posible generar un campo sonoro con la disposición de transductor ultrasónico desvelada en el documento DE 199 28 765 A1 que se extienda por lo menos en dos dimensiones de manera homogénea en el espacio. Los transductores ultrasónicos no son adecuados para pruebas ultrasónicas, en las que se usa aire como medio de acoplamiento. En el documento DE 199 28 765 A1 tampoco se encuentra una indicación referente al uso de la disposición de transductor ultrasónico en la prueba ultrasónica aérea de defectos de material.

El documento DE 40 10 294 A1 desvela una sonda ultrasónica formada por un material piezoeléctrico de varias capas. Las distintas capas pieza eléctricas se disponen consecutivamente, visto en la dirección de la radiación. El documento DE 40 10 294 A1 no desvela una sonda ultrasónica, en la que los electrodos se disponen de forma anular y unos alrededor de otros. En el documento DE 40 10 294 A1 tampoco se encuentra alguna indicación sobre el uso de la sonda ultrasónica en la prueba ultrasónica aérea de defectos de material.

### Descripción de la invención

El objetivo de la presente invención consiste en superar las desventajas del Estado de la técnica y proveer un sistema ultrasónico aéreo y un procedimiento que se adapten en particular a la prueba ultrasónica aérea y que sean apropiados para los ensayos de materiales de composite y otros compuestos, para detectar defectos tales como inclusiones de aire, deslaminaciones, defectos de adhesión, impurezas, canales, grietas, defectos de unión (*kissing bonds*), etc.

La presente invención se refiere a la prueba ultrasónica acoplada por aire, en la que se usa aire como medio de acoplamiento. En esto se presenta un problema técnico particular: En los cabezales de prueba ultrasónica clásicos, la señal ultrasónica se refleja casi por completo en la superficie limítrofe entre el cabezal de prueba y el aire. Sólo una parte muy pequeña de la señal puede salir del cabezal de prueba o ser recibida por el mismo, respectivamente. Correspondientemente altas son las pérdidas por reflexión al pasar por las superficies limítrofes. Cabe destacar que en la prueba ultrasónica acoplada por aire es necesario superar por lo menos cuatro superficies limítrofes, de lo que resulta una amortiguación sustancial de la señal. En este contexto, bajo una superficie limítrofe se ha de entender la zona de contacto entre el aire u otro gas o mezcla gaseosa y una sustancia sólida. Esta sustancia sólida puede ser, por ejemplo, la superficie del cuerpo de ensayo o la superficie del transductor ultrasónico. Debido a la amortiguación sustancial de la señal en la prueba ultrasónica acoplada por aire, se plantean exigencias específicas para la construcción y la potencia acústica de las sondas ultrasónicas.

El objetivo de la presente invención se consigue a través de un sistema ultrasónico aéreo para la prueba acoplada por aire de materiales, que presenta un transductor ultrasónico como emisor y un transductor ultrasónico como receptor, así como medios electrónicos de emisión-recepción con digitalizador y un dispositivo de cómputo con el software de control y de evaluación, en lo que los transductores ultrasónicos son transductores ultrasónicos de elementos múltiples y presentan respectivamente por lo menos tres o cuatro elementos emisores y/o elementos

receptores, caracterizado por que los elementos emisores y/o los elementos receptores están diseñados de tal manera que pueden ser controlados con diferentes frecuencias, en lo que un primer elemento emisor se controla con una frecuencia de 370 a 390 kHz, un segundo elemento emisor con una frecuencia de 390 a 410 kHz y un tercer elemento emisor con una frecuencia de 410 a 430 kHz.

5 El núcleo de la presente invención está representado por el transductor ultrasónico, que consiste de varios elementos emisores y/o elementos receptores. Bajo un transductor ultrasónico se ha de entender en particular un transductor de señales, que transforma y/o invierte oscilaciones acústicas en señales electrónicas o eléctricas. El transductor aquí descrito puede transformar tanto señales eléctricas en señales acústicas, como también señales acústicas en señales eléctricas.

10 Preferentemente, el transductor ultrasónico presenta 3, 4, 5 o más elementos emisores y/o elementos receptores. De acuerdo con la presente invención, el transductor ultrasónico presenta tres o cuatro elementos emisores y/o elementos receptores, en lo que los elementos emisores y/o los elementos receptores pueden ser o son controlados con diferentes frecuencias. Mediante la superposición de los campos sonoros de los elementos emisores se obtiene una señal de sumación. En la tecnología de información en fases (*phased array*) aplicada convencionalmente, los elementos individuales (de transductor de emisión) se controlan con desplazamiento de fase. La señal de sumación puede controlarse espacialmente a través de este tipo de excitación. Sin embargo, no es posible lograr el aumento de la anchura de banda que se requiere para la prueba de materiales de composite y otros compuestos para la detección de errores. El dispositivo de acuerdo con la presente invención, en particular el transductor ultrasónico de acuerdo con la presente invención, presenta la ventaja de que mediante el control de los elementos emisores y/o de los elementos receptores con diferentes frecuencias se logra un aumento sustancial de la anchura de banda de la señal de medición.

20 Por lo tanto, la presente invención también se refiere a un transductor ultrasónico de elementos múltiples, que presenta por lo menos tres o cuatro elementos emisores y/o elementos receptores, caracterizado por que los elementos emisores y/o los elementos receptores están diseñados de tal manera que un primer elemento emisor se controla con una frecuencia de 370 a 390 kHz, un segundo elemento emisor se controla con una frecuencia de 390 a 410 kHz y un tercer elemento emisor se controla con una frecuencia de 410 a 430 kHz.

25 La difusión espacial del ultrasonido y la homogeneidad del campo sonoro se ven influenciadas principalmente por la forma de los elementos individuales. Por esta razón, los elementos emisores y/o los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples se realizan de manera anular o circular. Es particularmente preferente si los elementos emisores y/o los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples se realizan de forma anular o circular y se disponen unos alrededor de otros. Esto presenta la ventaja de que con transductores dispuestos de manera anular, y en particular unos alrededor de otros, se puede generar un campo acústico que se extiende de manera homogénea en el espacio por lo menos en dos dimensiones. En cambio, con una formación lineal sólo es posible generar campos acústicos que se extienden homogéneamente en tan sólo una dimensión.

30 La frecuencia es determinada en gran medida por la geometría de los elementos individuales. La expresión "la geometría de los elementos individuales", en el sentido de la presente invención, se refiere a la configuración espacial de los elementos individuales, tales como la anchura, el espesor (altura) y la longitud o el diámetro. Los elementos individuales, por lo tanto, preferentemente pueden adaptarse a la frecuencia que se quiere excitar. En particular, su frecuencia puede variarse mediante la variación del espesor de los elementos individuales. Por el uso de materiales de composite que en sí son conocidos en el ámbito técnico del ultrasonido, es posible variar el espesor de los elementos individuales, y por ende la frecuencia. En una forma de realización de la presente invención, todos los elementos individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples pueden estar hechos del mismo material de composite. En otra forma de realización de la presente invención, los elementos individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples pueden estar formados por diferentes materiales de composite. En otra forma de realización de la presente invención, los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples pueden estar hechos del mismo material de composite, y los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples pueden estar hechos de otro material de composite.

35 40 45 50 55 Los elementos emisores y/o los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención, normalmente están hechos de materiales piezoelectricos. Los materiales piezoelectricos se seleccionan, por ejemplo, de monocristales (cuarzo, PMN-PT,  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ) y cerámicas policristalinas (por ejemplo, PZT, metaniobato de plomo). Éstos se usan como vibradores de volumen (discos, anillos, cilindros) o como capas sobre substratos. En los últimos años, los nuevos materiales tales como las hojas pieza eléctrica (PVDF) y el composite de cerámica-polímero han ampliado sustancialmente el espectro de los cabezales para pruebas ultrasónicas. También estos nuevos materiales son apropiados para fabricar el transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención.

60 65 En una forma de realización preferente de la presente invención, la electrónica de emisión presenta un procesador de señales, un amplificador digital y un transductor de emisión. En otra forma de realización preferente de la presente invención, la electrónica de recepción presenta un transductor de recepción, un preamplificador, un

amplificador y un convertidor analógico/digital (transductor a/d).

Los componentes de la electrónica de emisión y de la electrónica de recepción son conocidos por los especialistas en la materia. Apropriados para el uso en el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención son los procesadores de señales convencionalmente disponibles, así como los amplificadores digitales, transductores de emisión, transductores de recepción, preamplificadores y convertidores analógico/digitales (transductores a/d).

En una forma de realización particularmente preferente de la presente invención, la electrónica de emisión es de varios canales y la electrónica de recepción también es de varios canales, en lo que la electrónica de emisión y la electrónica de recepción presentan por lo menos tantos canales como transductores ultrasónicos. Preferentemente, los emisores multicanal y los receptores multicanal presentan 3, 4, 5 o más elementos emisores y/o elementos receptores. Es particularmente preferente si el emisor multicanal y el receptor multicanal presentan tres o cuatro elementos emisores y/o elementos receptores.

Los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples normalmente envían señales ultrasónicas con diferentes frecuencias en el alcance de 20 kHz y 10 MHz. Preferentemente, los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples envían señales ultrasónicas con diferentes frecuencias en el alcance de 50 kHz a 1 MHz, y de manera particularmente preferente en el alcance de 50 kHz a 500 kHz o de 100 kHz a 250 kHz. Alternativamente, también es posible la medición de valores individuales con tan sólo una frecuencia.

En una forma de realización preferente, el sistema ultrasónico aéreo presenta un transductor ultrasónico que consiste en 3 elementos individuales dispuestos unos alrededor de otros, en los que el primer elemento emite señales ultrasónicas con una frecuencia de 370 a 390 kHz, el segundo elemento emite señales ultrasónicas con una frecuencia de 390 a 410 kHz y el tercer elemento emite señales ultrasónicas con una frecuencia de 410 a 430 kHz. En una forma de realización particularmente preferente, el sistema ultrasónico aéreo presenta un transductor ultrasónico que consiste en 3 elementos individuales dispuestos uno alrededor de otro, en los que el primer elemento emite señales ultrasónicas con una frecuencia de 380 kHz, el segundo elemento emite señales ultrasónicas con una frecuencia de 400 kHz y el tercer elemento emite señales ultrasónicas con una frecuencia de 420 kHz. Estas formas de realización del transductor ultrasónico de acuerdo con la presente invención de manera sorprendente han demostrado ser particularmente apropiadas en la caracterización de superficies y/o en el examen de materiales de composite, uniones adhesivas y compuestos de materiales para detectar errores, tales como inclusiones de aire, deslaminaciones, errores de adhesión, impurezas, canales, agrietamientos y defectos de unión (*kissing bonds*).

La disposición de los transductores de emisión y de los transductores de recepción puede ser diferente. En una forma de realización, en el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención, el transductor de emisión y el transductor de recepción están dispuestos en un cabezal palpador. Esto permite realizar la prueba ultrasónica con el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención en el modo de funcionamiento de refracción. En otra forma de realización, igualmente preferente, en el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención se disponen transductores de emisión y transductores de recepción de manera separada entre sí como cabezales palpadores separados. Esto permite realizar la prueba ultrasónica con el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención en el modo de funcionamiento conforme al procedimiento de examen ultrasónico o en la configuración "*pitch-catch*".

Para controlar el transductor ultrasónico de acuerdo con la presente invención se requiere una electrónica de emisión-recepción especial. Debido a que los diferentes elementos vibradores del transductor ultrasónico de elementos múltiples tienen que ser controlados en paralelo, el sistema ultrasónico aéreo debe presentar por lo menos tantos canales como el transductor ultrasónico mismo. En una forma de realización particularmente preferente de la presente invención, el emisor de canales múltiples está diseñado de tal manera que todos los canales se pueden controlar de manera sincrónica o con igualdad de fase con una alta exactitud cronológica. El control con igualdad de fase se refiere a la primera excitación sincrónica de los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples. En el lado de recepción, las señales son procesadas previamente, amplificadas y digitalizadas analógicamente por el transductor ultrasónico. Las tolerancias en la electrónica de recepción se pueden determinar mediante mediciones de calibración y corregir en el software de la unidad de cómputo.

En otra forma de realización particularmente preferente, el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención presenta una combinación del transductor ultrasónico de elementos múltiples con el emisor de canales múltiples y el receptor de canales múltiples, la que está configurada de tal manera que es posible lograr el aumento de la anchura de banda de la señal ultrasónica, y por ende la realización de una sola medición. En una forma de realización extremadamente apropiada, el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención emplea ventajosamente y de manera específica una estructura de electrodos de forma anular, y esto no sólo para generar un campo acústico, sino también para ampliar la anchura de banda a través de un control de frecuencia diferente y específico de los distintos electrodos. Esto difiere de manera fundamental de los sistemas convencionales. Preferentemente, se usan transductores de piezo-composite, en los que los espacios intermedios entre los diferentes electrodos están rellenos, por ejemplo, con un material plástico comúnmente usado en la tecnología

ultrasónica. Esto difiere de manera fundamental de los sistemas convencionales.

Preferentemente, la electrónica de emisión y de recepción está conectada con un dispositivo de cómputo. Como dispositivo de cómputo se puede usar cualquier sistema de procesamiento de datos conocido, por ejemplo, un ordenador de sobremesa (PC), un ordenador móvil (laptop) un ordenador tipo tableta, un teléfono móvil, un aparato de mando especial, etc. Para esto, el dispositivo de cómputo actúa por medio de una conexión de comunicación, por ejemplo, una interfaz serial o paralela por cable, una conexión por USB, una conexión por mini-USB, o bien una conexión por WLAN o Bluetooth, en cooperación con la electrónica de emisión y de recepción.

Para el software de control y de evaluación se usan soluciones convencionales en sí, aunque éstas presentan determinadas particularidades conforme al sistema ultrasónico de acuerdo con la presente invención y al procedimiento descrito más abajo, en particular en lo referente al control de los elementos individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples con diferentes frecuencias y la formación del espectro de sumación a partir de los espectros individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples en la evaluación de las mediciones de ultrasonido.

Por esta razón, la presente invención también proporciona un producto de programa de ordenador para controlar los elementos individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples con diferentes frecuencias. En otra forma de realización, la invención provee un producto de programa de ordenador para evaluar las mediciones ultrasónicas aéreas a lo largo de extenso alcance de frecuencias, por ejemplo, a lo largo de por lo menos un 80 % del alcance de frecuencias ultrasónicas, en particular mediante la formación del espectro de sumación a partir de los espectros individuales de los elementos individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención.

La presente invención provee además un procedimiento para la medición de banda ancha de cuerpos de ensayo con transductores ultrasónicos de elementos múltiples, en particular transductores ultrasónicos aéreos de elementos múltiples, en el que se usa el sistema ultrasónico aéreo descrito más arriba.

Las ventajas descritas más arriba y formas de realización ventajosas del sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención y de los transductores ultrasónicos de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención son igualmente aplicables al procedimiento descrito más abajo, de tal manera que se puede hacer referencia a mencionado previamente.

En una forma de realización preferente, el procedimiento presenta las siguientes etapas:

- Controlar los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples con diferentes frecuencias;
- emitir una señal ultrasónica de banda ancha por medio de los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples;
- recibir/medir la señal ultrasónica de banda ancha a través de los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples y formar espectros individuales;
- preprocesar analógicamente, amplificar y digitalizar las señales ultrasónicas recibidas por los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples; y
- evaluar las señales ultrasónicas recibidas.

Mediante el preprocesamiento analógico, la amplificación y la digitalización de las señales ultrasónicas recibidas por los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples se forma un espectro, que resulta de la suma de los espectros individuales superpuestos. Por el número de elementos individuales y su escalonamiento de frecuencias se puede influenciar correspondientemente la forma del espectro. Rigen las leyes del teorema de Fourier, que son conocidas por los especialistas en la materia. Las tolerancias en la electrónica de recepción que pueden determinar con ayuda de mediciones de calibración y corregir en el software del dispositivo de cómputo.

La evaluación de los espectros se efectúa usando las propiedades dispersivas de los objetos de ensayo que se van a examinar con relación a la interacción con el ultrasonido. A esto contribuyan tanto a las propiedades de material, tales como, por ejemplo, la amortiguación dependiente de la frecuencia, así como también las propiedades geométricas, por ejemplo, el comportamiento de dispersión en función de la frecuencia en las superficies limítrofes para modificar la señal ultrasónica medida. Las propiedades de material y la estructura de superficie de los objetos de ensayo ejercen influencia sobre la señal de medición. Por ejemplo, la señal reflejada por las superficies del material es mucho más alta que la señal reflejada desde el interior del material. Con el procedimiento y el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención es posible suprimir o eliminar influencias condicionadas por la superficie en la señal de medición, al igual que la superposición de la propia señal que se va a medir (desde la superficie o desde el interior del material).

Esto permite lograr mecanismos de contraste novedosos, por ejemplo, a través de procedimientos de correlación entre mediciones con diferentes frecuencias. El aumento de la anchura de banda efectiva por el uso combinado de los transductores ultrasónicos de elementos múltiples y el sistema de medición de canales múltiples permite realizar

una única medición. Esto elimina en particular la influencia del montaje de transductores en análisis realizados de manera similar mediante el uso de varias mediciones con diferentes frecuencias de medición.

5 Adicionalmente, el procedimiento de acuerdo con la presente invención también puede comprender una etapa de clasificación de errores, en el que a través de la clasificación de los errores se puede determinar el tipo y severidad del error de material.

10 El procedimiento y el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención son apropiados para la medición de banda ancha de juntas de unión, materiales de composite y compuestos de material en diferentes ámbitos. El procedimiento y el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención son particularmente apropiados para la prueba de juntas de unión entre diferentes tipos de material, por ejemplo, en el ámbito de la construcción ligera. En este ámbito es posible detectar deslaminaciones que de otra manera son difícilmente detectables ("*weak bonds*" o "*kissing bonds*"). El procedimiento y el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención también presentan ventajas particulares en la prueba de errores en estructuras tipo sándwich. En este ámbito es posible detectar errores en combinaciones de materiales de diferentes clases (por ejemplo, chapa y material adhesivo). El procedimiento y el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención en general son bien apropiados para la prueba de errores en uniones adhesivas, debido a las propiedades dispersivas de los adhesivos. Asimismo, el procedimiento y el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención también son ventajosos en comparación con los sistemas convencionales en la caracterización de superficies de materiales y se usan, por ejemplo, para la prueba y distinción de la calidad superficial y para distinguir entre defectos de integridad de superficie y de volumen. En los materiales de composite y en los materiales compuestos, el procedimiento y el sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención se pueden emplear para detectar inclusiones de aire, deslaminaciones, defectos de adhesión, impurezas, canales, agrietamientos y *kissing bonds*.

25 La presente invención se describe más detalladamente a continuación con referencia a 11 dibujos y un ejemplo de realización.

En los dibujos:

- 30 La **figura 1** muestra un transductor ultrasónico de elementos múltiples.
- La **figura 2** representa la determinación del espectro de sumación de acuerdo con la presente invención.
- 35 La **figura 3** muestra una forma de realización del principio de construcción del sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención para el examen ultrasónico.
- La **figura 4** muestra una forma de realización del principio de construcción del sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención en la configuración de *pitch-catch*.
- 40 La **figura 5** muestra una forma de realización del principio de construcción del sistema ultrasónico aéreo de acuerdo con la presente invención para el examen de reflexión.
- La **figura 6** muestra el espectro medido de un transductor ultrasónico convencional.
- 45 La **figura 7** muestra el espectro medido del transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención.
- La **figura 8** muestra un escaneo de referencia de una muestra de adhesivo, realizada con un transductor ultrasónico convencional.
- 50 La **figura 9** muestra escaneos de una muestra de adhesivo, realizados con el transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención.
- La **figura 10** muestra la evaluación espectral del escaneo de la muestra de adhesivo.
- 55 La **figura 11** muestra una comparación de secciones con defectos en una muestra de adhesivo.

60 El transductor ultrasónico de elementos múltiples 10 mostrado en la **figura 1** presenta a modo de ejemplo tres electrodos de forma anular 11, 12 y 13. La figura 1A muestra una sección transversal del transductor ultrasónico de elementos múltiples 10. El transductor ultrasónico de elementos múltiples 10 presenta además un cuerpo de amortiguación 14, material piezoeléctrico 15, el electrodo 16 y una capa de adaptación 17. La figura 1B muestra la estructura de los electrodos (estructura de los elementos individuales) del transductor ultrasónico de elementos múltiples 10 en una vista frontal. La excitación de los elementos individuales 11, 12 y 13 se puede efectuar, por ejemplo, con las siguientes frecuencias:

65

Electrodo	Frecuencia de excitación, ejemplo 1	Frecuencia de excitación, ejemplo 2
11	150 kHz	380 kHz
12	200 kHz	400 kHz
13	250 kHz	420 kHz

Por el número de elementos y el escalonamiento de la frecuencia se puede influenciar correspondientemente la forma del espectro. Rigen las leyes del teorema de Fourier. El espectro resultante se obtiene de la suma de los espectros individuales superpuestos.

5 La **figura 2** muestra un esquema de principio de la determinación del espectro de suma obtenida de la superposición de tres espectros individuales, que fueron generados, por ejemplo, mediante el uso del transductor ultrasónico de elementos múltiples mostrado en la figura 1, en lo que el espectro A fue generado por un primer transductor ultrasónico, el espectro B por un segundo transductor ultrasónico y el espectro C por un tercer transductor ultrasónico. El espectro D muestra el espectro de suma determinado basándose en los espectros individuales A, B y C. A este respecto, los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples fueron excitados con diferentes frecuencias, por lo que los elementos emisores del transductor ultrasónico de elementos múltiples emitieron una señal ultrasónica de banda ancha, por ejemplo, en el alcance de 150 kHz a 250 kHz o en el alcance de 380 kHz a 420 kHz. La señal ultrasónica de banda ancha fue recibida por los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples. Posteriormente se efectuó el preprocesamiento analógico, la amplificación y la digitalización de las señales ultrasónicas recibidas por los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples y basándose en esto se formaron los espectros individuales A, B y C. Basándose en los espectros individuales A, B y C se formó el espectro de suma D.

20 La **figura 3** muestra el principio de construcción del sistema ultrasónico aéreo 20 de acuerdo con la presente invención con la electrónica de emisión y de recepción. La electrónica de emisión presenta un procesador de señales 24, un amplificador digital 23 y un emisor de canales múltiples 21. La electrónica de recepción presenta un receptor de canales múltiples 22, un preamplificador 25 por canal, un amplificador 26 y un convertidor analógico-digital 27. Además, se muestra un dispositivo de cómputo con unidad procesadora central (CPU) 28. La forma de realización mostrada en este ejemplo se usa para el examen de objetos de ensayo a través del examen ultrasónico de penetración, ya que el emisor de canales múltiples 21 y el receptor de canales múltiples 22 se encuentran dispuestos en lados diferentes del objeto de ensayo 29. En la forma de realización mostrada, el sistema ultrasónico aéreo dispone de cuatro canales. En el lado de recepción, las señales son preprocesadas, amplificadas y digitalizadas analógicamente por el transductor ultrasónico. Las tolerancias en la electrónica de recepción se pueden determinar a través de mediciones de calibración y corregir en el software del dispositivo de cómputo 28. El aumento de la anchura de banda efectiva mediante el uso combinado de los transductores ultrasónicos de elementos múltiples y el sistema de medición de canales múltiples permite realizar una sola medición. Esto elimina en particular la influencia del montaje de transductores en un análisis efectuado de manera similar mediante el uso de varias mediciones con diferentes frecuencias de medición y transductores individuales.

35 La **figura 4** muestra el principio de construcción del sistema ultrasónico aéreo 20 como en la figura 3, pero en la configuración de *pitch-catch*. El emisor de canales múltiples 21 y el receptor de canales múltiples 22 se disponen en el mismo lado del objeto de ensayo 29. Las ondas ultrasónicas en medios infinitamente extensos se pueden difundir como así llamadas ondas longitudinales, lineales o de presión, en las que la dirección de oscilación es paralela a la dirección de difusión de la onda, o bien como ondas transversales, cizallamiento o de empuje, en las que el material oscila de manera perpendicular a la dirección de expansión. Las ondas transversales sólo pueden presentarse en cuerpos sólidos, ya que las sustancias líquidas o gaseosas no pueden absorber fuerzas cizallantes. La delimitación de un material permite otros modos de onda característicos, tales como ondas de dilatación, flexión y/o superficiales, las así llamadas ondas de bastón, de placa o de Lamb. Con la configuración de *pitch-catch* se pueden identificar errores de material basándose en la modificación de los modos de onda característicos.

La **figura 5** muestra el principio de construcción del sistema ultrasónico aéreo 20 como en la figura 3, pero para el funcionamiento de reflexión, en el que el emisor de canales múltiples 21 y el receptor de canales múltiples 22 se disponen en el mismo lado del objeto de ensayo 29. Desde el emisor de canales múltiples se introducen ondas ultrasónicas en el objeto de ensayo. Las señales ultrasónicas reflejadas desde la superficie del objeto de ensayo y/o por el material o la estructura interior del objeto de ensayo, respectivamente, se miden y se evalúan.

**Ejemplo de realización - Comparación del transductor ultrasónico de elementos múltiples con transductores ultrasónicos aéreos convencionales**

55 La **figura 6** muestra el espectro del transductor ultrasónico convencional CF400, y la **figura 7** muestra el espectro del transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención CF400\_3F. El transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención CF400\_3F presenta tres transductores de forma anular, dispuestos unos alrededor de otros, 11, 12, 13, en los que cada transductor se controla con una frecuencia diferente (frecuencia baja (380 kHz), frecuencia media (400 kHz) y frecuencia alta (420 kHz)).

Se puede ver claramente que la anchura de banda a media amplitud (máximo) en el transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención (figura 7) es más ancha que en los transductores ultrasónicos aéreos convencionales (figura 6). Además, con las tres frecuencias nominales diferentes (380 kHz, 400 kHz y 420 kHz) se pueden ver picos de los elementos individuales en el espectro general.

Para efectuar mediciones de comparación con el transductor ultrasónico convencional CF400 y el transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención CF400\_3F, se fabricó un cuerpo de ensayo de referencia. En el cuerpo de ensayo de referencia se trata de dos placas unidas adhesivamente entre sí, en las que en una de las placas se fresó con un rótulo y un logotipo de la empresa Sonotec. Los signos fresados representan sitios de efecto artificiales, los que contienen aire y, por lo tanto, actúan como inclusiones de aire en la medición ultrasónica aérea. Por lo demás, las placas fueron correctamente unidas en sus superficies con material adhesivo.

Para la comparación de los transductores ultrasónicos se produjo un escaneo de referencia con cabezales de prueba CF400 comercialmente disponibles y este fue evaluado como imagen de amplitud a máxima amplitud. El resultado se representa en la **figura 8**. Este escaneo luego se repitió con el transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención. La evaluación de la amplitud se hizo de manera filtrada sobre las tres frecuencias individuales. Los resultados se muestran en las **figuras 9A, 9B y 9C**. La figura 9A muestra el resultado de escaneo con la frecuencia nominal más baja (380 kHz) del transductor CF400\_3F. La figura 9B muestra el resultado de escaneo con la frecuencia nominal media (400 kHz) del transductor CF400\_3F. La figura 9C muestra el resultado de escaneo con la frecuencia nominal más alta (420 kHz) del transductor CF400\_3F.

En la comparación de los resultados de escaneo se pudo ver que las características de prueba de la placa de referencia, es decir, el rótulo SONOTEC y el logotipo se representan con todas las frecuencias, incluyendo la frecuencia del escaneo de referencia. En la unión adhesiva, sin embargo, existen errores de adhesión en determinados sitios, que sólo se pudieron reconocer en función de la frecuencia. Estos errores de adhesión se encuentran, por ejemplo, encima de la segunda letra "O" y encima de las letras "EC" en el rótulo SONOTEC (resaltado con recuadros negros y blancos en las figuras 8, 9A, 9B y 9C). La **figura 11** muestra una comparación de secciones de la zona ubicada encima de la segunda letra "O" en el rótulo SONOTEC de las figuras 8, 9A, 9B y 9C. En la medición de referencia con el transductor ultrasónico convencional de banda estrecha CF400 no se puede ver el error de adhesión encima de la segunda letra O. Asimismo, no se puede ver el error con la frecuencia baja (380 kHz) del transductor ultrasónico de elementos múltiples de acuerdo con la presente invención. Sin embargo, con las frecuencias mayores (400 kHz y 420 kHz), si se puede detectar el error.

La **figura 10** muestra la evaluación espectral de los resultados de medición. La dependencia de la frecuencia de los resultados de medición en uniones adhesivas en el alcance ultrasónico aéreo abre con los transductores de banda ancha la nueva posibilidad de una evaluación espectral. En este método, el escaneo se evalúa con varias frecuencias y los resultados se comparan entre sí. El resultado de esta comparación (figuras 10 y 11) demuestra que en particular en el caso de las uniones adhesivas existen tipos de errores que sólo se pueden detectar de manera confiable con determinadas frecuencias. En la figura 10, estos sitios, en los que se producen desviaciones significativas con las diferentes frecuencias, se representan en color negro. En los errores marcados con recuadros negros se destaca de manera particular el potencial de los transductores de banda ancha de acuerdo con la presente invención. Los recuadros negros marcan errores que o bien no se pueden detectar con los transductores ultrasónicos convencionales o sólo se detectan de forma demasiado pequeña, ya que éstos no presentan la anchura de banda requerida para una detección de errores confiable.

#### Lista de caracteres de referencia

50	10	Transductor ultrasónico de elementos múltiples
	11, 12, 13	Electrodos, convertidor, transductor emisor, transductor receptor
	14	Cuerpo de amortiguación
	15	Material piezoeléctrico
	16	Electrodo
55	17	Capa de adaptación
	20	Sistema ultrasónico aéreo
	21	Emisor, emisor de canales múltiples
	22	Receptor, receptor de canales múltiples
	23	Amplificador digital
60	24	Procesador de señales
	25	Preamplificador
	26	Amplificador
	27	Convertidor analógico-digital
	28	Dispositivo de cómputo
65	29	Objeto de ensayo

REIVINDICACIONES

1. Sistema ultrasónico aéreo (20) para la prueba acoplada por aire de materiales, que presenta un transductor ultrasónico, electrónica de emisión-recepción con digitalizador (27) y un dispositivo de cómputo (28) con software de control y evaluación, **caracterizado por que** el transductor ultrasónico es un transductor ultrasónico de elementos múltiples (10) y presenta por lo menos tres o cuatro elementos emisores y/o elementos receptores (11, 12, 13), en donde los elementos emisores y/o los elementos receptores (11, 12, 13) están diseñados de forma anular o circular y están dispuestos unos alrededor de otros; y en donde los elementos emisores (11, 12, 13) se pueden controlar con diferentes frecuencias, controlándose un primer elemento emisor con una frecuencia de 370 a 390 kHz, controlándose un segundo elemento emisor con una frecuencia de 390 a 410 kHz y controlándose un tercer elemento emisor con una frecuencia de 410 a 430 kHz, en donde la electrónica de emisión-recepción está configurada para controlar los por lo menos tres o cuatro elementos emisores anulares o circulares del transductor ultrasónico de elementos múltiples, emitiéndose y recibiendo una señal ultrasónica de banda ancha y basándose en ella se forman espectros individuales; y el dispositivo de cómputo está configurado para formar un espectro, que resulta de la suma de los espectros individuales superpuestos de los elementos individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples.
2. Sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** los elementos emisores y/o los elementos receptores (11, 12, 13) están diseñados de tal manera que mediante el control de varios elementos individuales con frecuencias diferentes se logra aumentar la anchura de banda del transductor ultrasónico de elementos múltiples (10).
3. Sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que la electrónica de emisión presenta un procesador de señales (24), un amplificador digital (23) y un emisor (21) y la electrónica de recepción presenta un receptor (22), un preamplificador (25), un amplificador (26) y un convertidor analógico/digital convertidor (a/d), (27), **caracterizado por que** el emisor (21) es un emisor de canales múltiples (21) y el receptor (22) es un receptor de canales múltiples (22), y en donde el emisor (21) y el receptor (22) presentan por lo menos tantos canales como el transductor ultrasónico de elementos múltiples (10).
4. Sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el emisor (21) y el receptor (22) están integrados en un cabezal de prueba, o en donde el emisor (21) y el receptor (22) están realizados de manera separada entre sí como cabezales de prueba separados.
5. Sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el emisor (21) y el receptor (22) están dispuestos de tal manera que el examen ultrasónico se puede efectuar en el modo de reflexión, o en donde el emisor (21) y el receptor (22) están dispuestos de tal manera que el examen ultrasónico se puede efectuar en el modo de examen ultrasónico de penetración, o en donde el emisor (21) y el receptor (22) están dispuestos en una configuración de *pitch-catch*.
6. Sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 3 a 5, **caracterizado por que** el emisor de canales múltiples (21) está diseñado de tal manera que todos los canales se pueden controlar de manera sincrónica con una precisión cronológica muy alta, en donde cada canal se puede controlar con una frecuencia diferente.
7. Sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 3 a 6, **caracterizado por que** mediante la combinación del transductor ultrasónico de elementos múltiples (10) con el emisor de canales múltiples (21) y el receptor de canales múltiples (22) es posible aumentar la anchura de banda de la señal ultrasónica, y con ello efectuar una sola medición.
8. Procedimiento para la medición de banda ancha de cuerpos de ensayo con transductores ultrasónicos aéreos de elementos múltiples (10), en donde en el procedimiento se usa un sistema ultrasónico (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** el procedimiento presenta las siguientes etapas:
- Controlar los tres o cuatro elementos emisores de forma anular o circular (11, 12, 13) del transductor ultrasónico de elementos múltiples (10), controlándose un primer elemento emisor con una frecuencia de 370 a 390 kHz, controlándose un segundo elemento emisor con una frecuencia de 390 a 410 kHz y controlándose un tercer elemento emisor con una frecuencia de 410 a 430 kHz;
  - enviar una señal ultrasónica de banda ancha mediante los tres o cuatro elementos emisores anulares o circulares (11, 12, 13) del transductor ultrasónico de elementos múltiples (10);
  - recibir/medir la señal ultrasónica de banda ancha mediante los tres o cuatro elementos receptores anulares o circulares del transductor ultrasónico de elementos múltiples y formar espectros individuales;
  - preprocesar analógicamente, amplificar y digitalizar las señales ultrasónicas recibidas por los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples (10);
  - evaluar las señales ultrasónicas recibidas;
- caracterizado por que** mediante el preprocesamiento analógico, la amplificación y la digitalización de las señales

ultrasónicas recibidas por los elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples se forma un espectro que resulta de la suma de los espectros individuales superpuestos de los elementos individuales del transductor ultrasónico de elementos múltiples (10).

- 5 9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8 o sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** el transductor ultrasónico de elementos múltiples (10) presenta por lo menos 3, 4, 5 o más elementos emisores y/o elementos receptores de forma anular o circular (11, 12, 13) y emite y recibe por lo menos 3, 4, 5 o más señales ultrasónicas con diferentes frecuencias.
- 10 10. Procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 8 o 9 o sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** los elementos individuales activos de forma anular o circular (11, 12, 13) están hechos de materiales de composite que presentan una geometría diferente, en particular un espesor diferente, y que la frecuencia de la señal ultrasónica emitida por un elemento emisor (11, 12, 13) es determinada por la geometría del material de composite, del que está hecho el elemento emisor (11, 12, 13).
- 15 11. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 8 a 10 o sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** las tolerancias en la electrónica de recepción se pueden determinar con la ayuda de mediciones de calibración y se pueden corregir mediante un software en el preprocesamiento analógico, la amplificación y la digitalización de las señales ultrasónicas recibidas por los
- 20 elementos receptores del transductor ultrasónico de elementos múltiples (10).
12. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 8 a 11 o sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** mediante una clasificación de errores se determina el tipo y la severidad del error de material.
- 25 13. Uso del procedimiento o del sistema ultrasónico aéreo (20) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 12 para la caracterización superficial y/o el examen de materiales de composite, uniones adhesivas y compuestos de materiales para detectar errores tales como inclusiones de aire, deslaminaciones, defectos de adhesión, impurezas, canales, grietas y defectos de unión (*kissing bonds*).
- 30

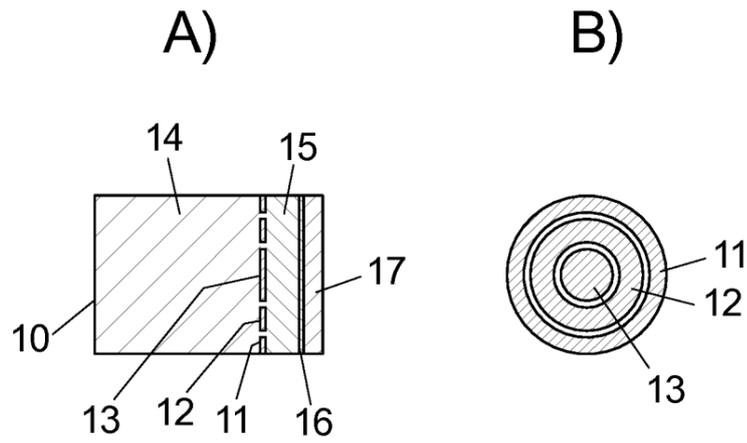


Fig. 1

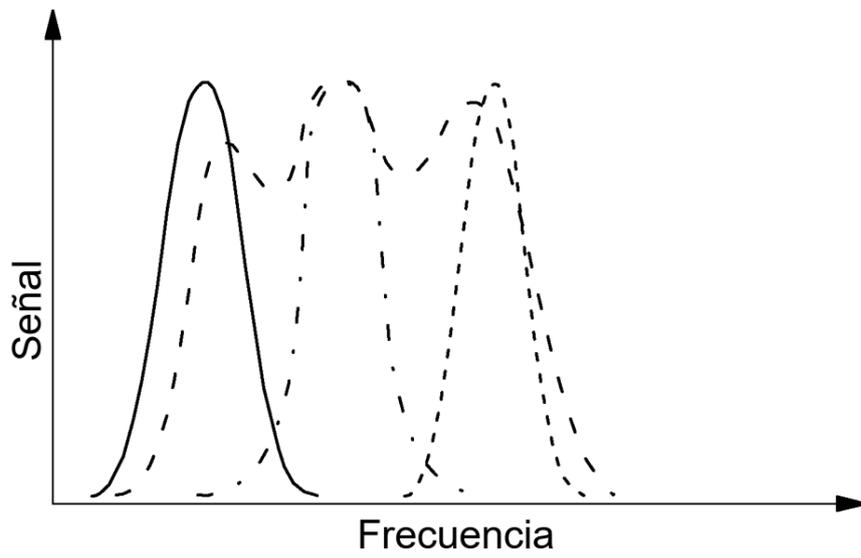


Fig. 2

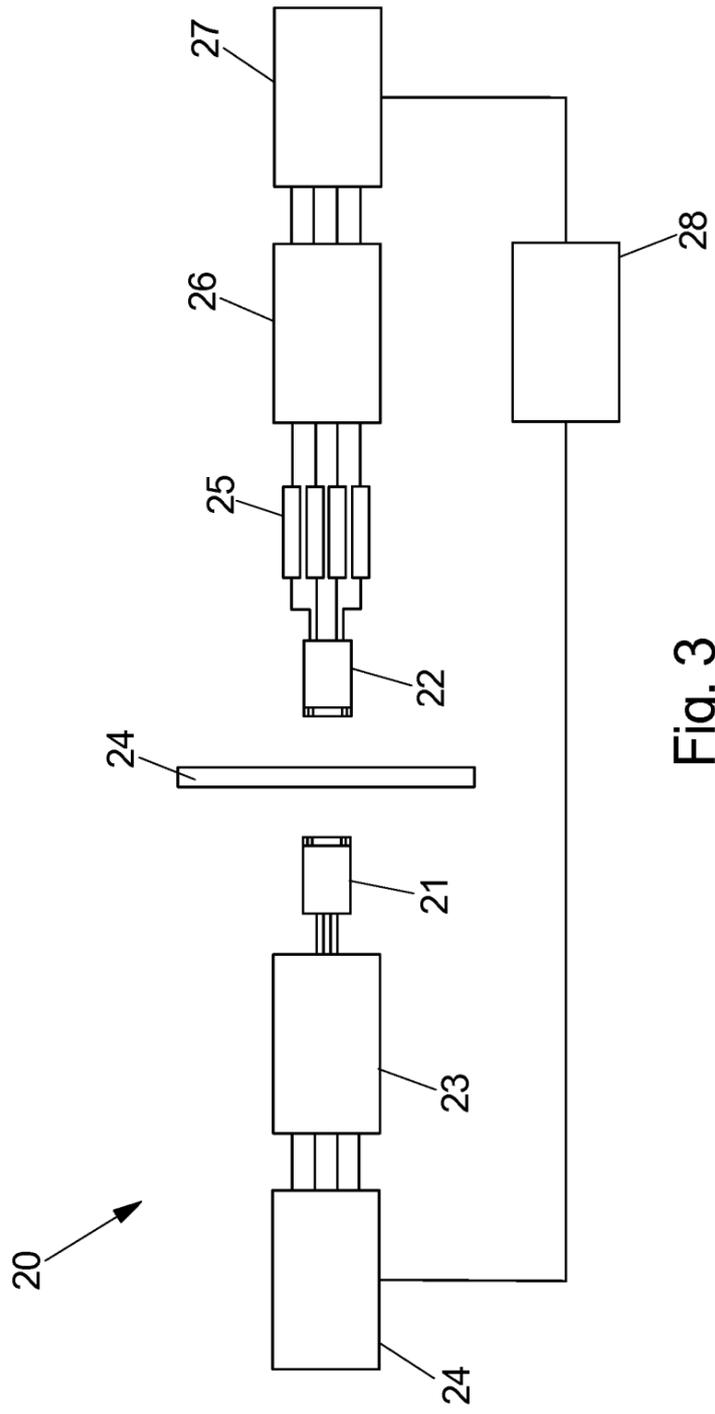


Fig. 3

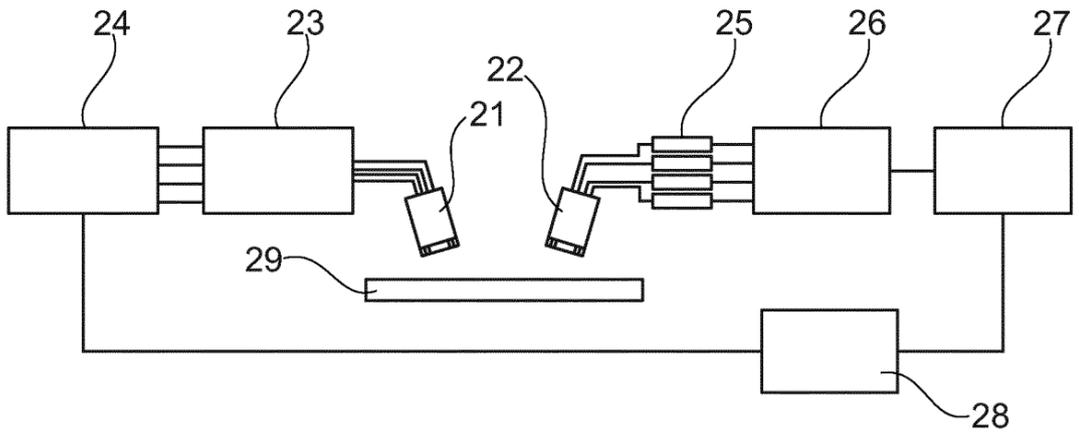


Fig. 4

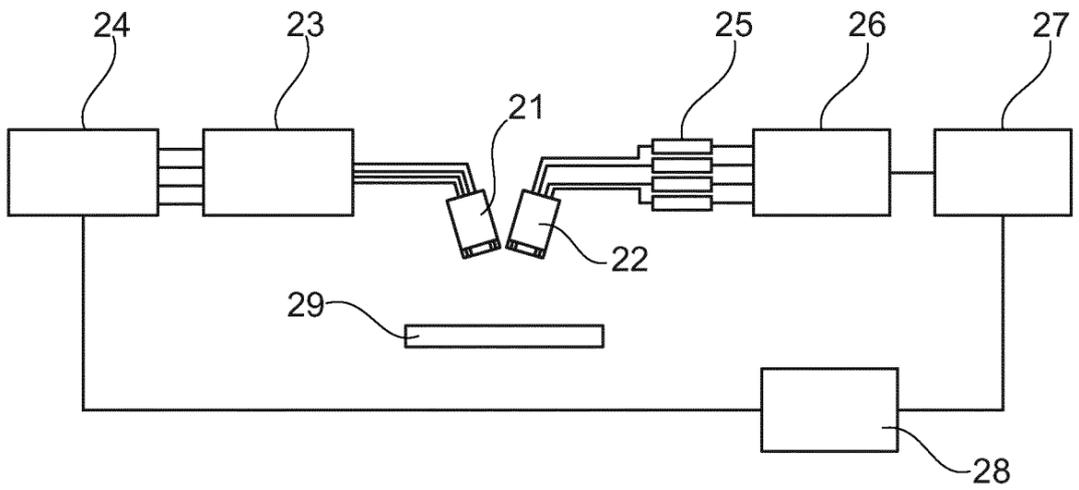


Fig. 5

Fig. 6

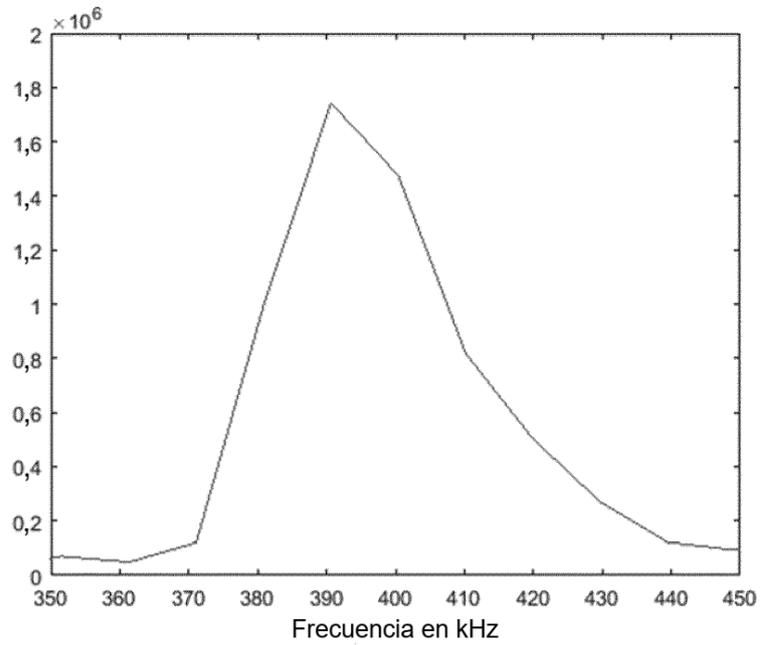


Fig. 7

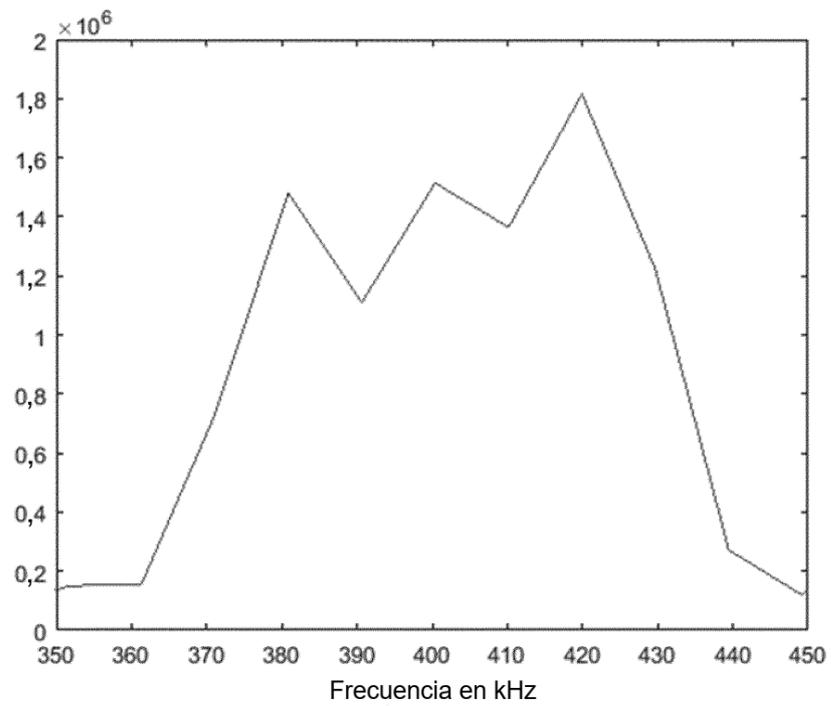


Fig. 8

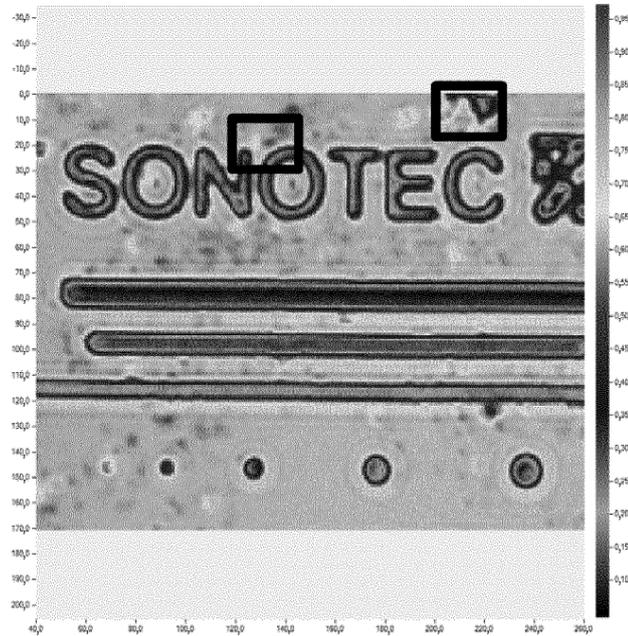


Fig. 9A

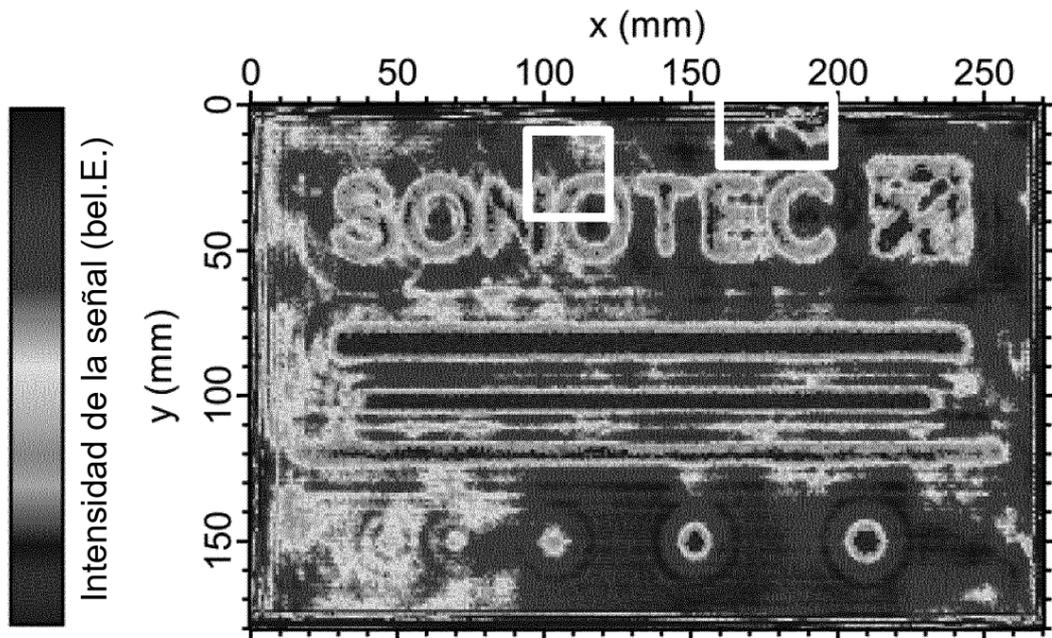


Fig. 9B

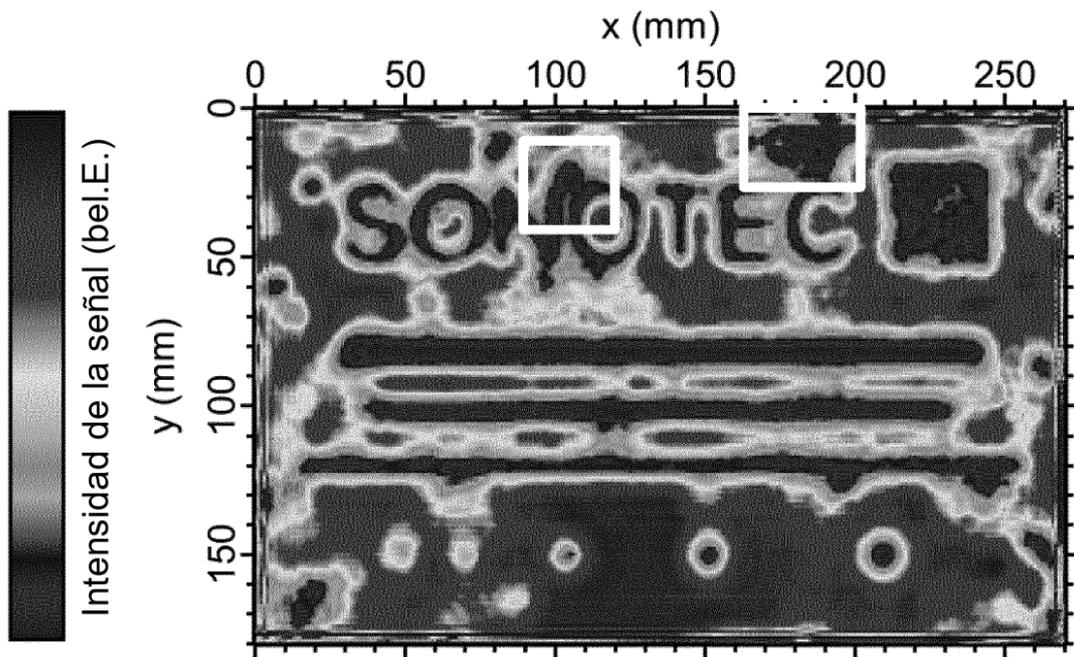


Fig. 9C

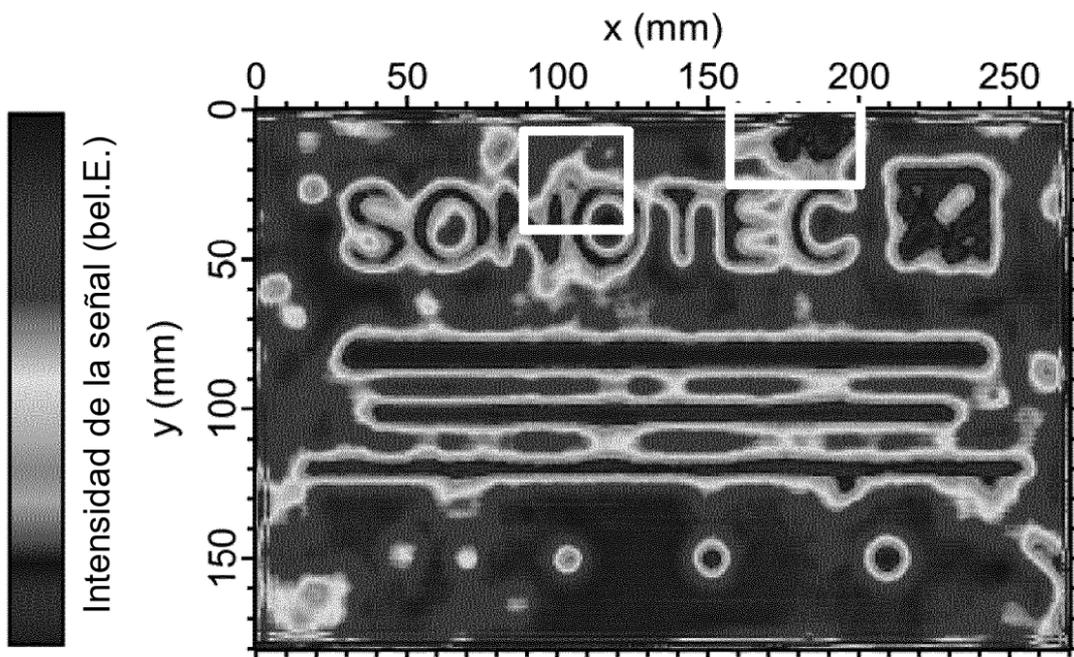


Fig. 10

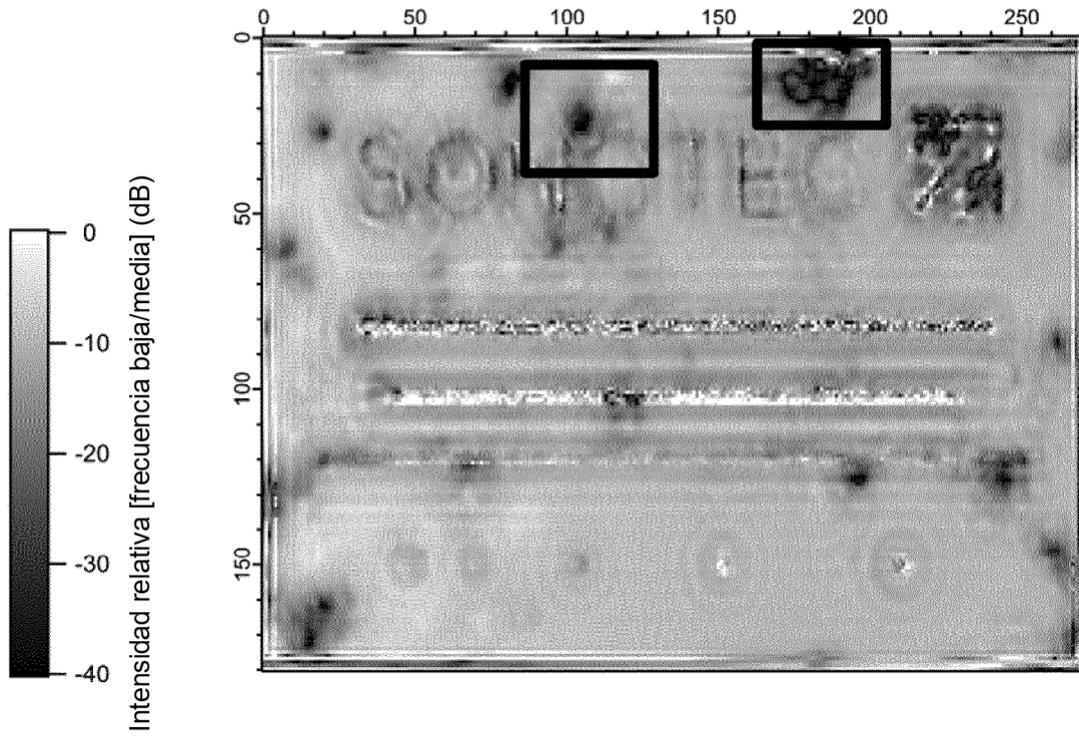


Fig. 11

