

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 389 355**

51 Int. Cl.:
G01N 29/24 (2006.01)
G01N 29/34 (2006.01)
G01N 29/38 (2006.01)
G01N 29/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **02796910 .4**
96 Fecha de presentación: **11.12.2002**
97 Número de publicación de la solicitud: **1454132**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.09.2004**

54 Título: **Instalación de inspección no destructiva con sensores ultrasónicos para productos de metalurgia**

30 Prioridad:
13.12.2001 FR 0116138

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
25.10.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
25.10.2012

73 Titular/es:
VALLOUREC & MANNESMANN TUBES (100.0%)
130 RUE DE SILLY
92100 BOULOGNE-BILLANCOURT, FR

72 Inventor/es:
BISIAUX, BERNARD;
VAHE, MICHEL y
CRETENOT, GUILLAUME

74 Agente/Representante:
ESPIELL VOLART, Eduardo María

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).

ES 2 389 355 T3

DESCRIPCIÓN

Instalación de inspección no destructiva con sensores ultrasónicos para productos de metalurgia.

La invención concierne a la inspección no destructiva, en particular en metalurgia y, más concretamente, a la inspección no destructiva de los tubos.

5 La fabricación de los tubos se está volviendo, tanto como sea posible, completamente automática. A la salida de fabricación, los tubos son sometidos a una inspección no destructiva por ultrasonidos, con el propósito de detectar selectivamente en ellos uno o varios defectos, a partir de las siguientes pruebas: defectos superficiales de orientaciones sensiblemente longitudinal y / o transversal, interiormente y / o exteriormente; defectos de espesor y / o en el espesor; se inspeccionan asimismo los diámetros interior y exterior.

10 En orden a inspeccionar completamente el volumen de los tubos, se imprime a los tubos un movimiento relativo helicoidal con relación a los sensores de ultrasonidos y los ultrasonidos son emitidos en disparos, a elevada cadencia, con una frecuencia de disparo llamada de "recurrencia".

15 El acoplamiento del sensor al tubo, indirecto, se efectúa dentro de un líquido, en general agua. En la práctica, se prevén, para detectar los diferentes defectos antedichos, unos sensores de ondas ultrasónicas longitudinales, los cuales "insonifican" el tubo según diferentes ángulos de incidencia. Los ángulos de incidencia se regulan en función de numerosos parámetros, entre ellos las dimensiones del tubo, sus propiedades de transmisión ultrasónica, los tipos de defectos que se persiguen, etc.

20 La frecuencia de recurrencia de los disparos está limitada por el tiempo de recorrido de ida y vuelta de los ultrasonidos en el líquido de acoplado y en el metal de los tubos. Un tiempo de recorrido elevado obliga entonces a disminuir la frecuencia de recurrencia y, por ende, la productividad de la inspección no destructiva.

De acuerdo con algunos modos de realización conocidos, los sensores son fijos y el tubo está animado de un movimiento helicoidal.

25 De acuerdo con otros modos de realización conocidos, los sensores o palpadores de ultrasonidos giran accionados a una velocidad de unas miles de vueltas por minuto, alrededor de un tubo que marcha a una velocidad lineal que puede llegar a aproximadamente 1 metro por segundo.

30 Aún en otros modos de realización conocidos, se utiliza un sensor constituido a partir de una multiplicidad de elementos transductores ultrasónicos que rodean el tubo. La sucesiva excitación de grupos de elementos transductores permite proceder a la "formación" de un haz ultrasónico, al que se puede asociar un ángulo de incidencia sobre el tubo. Asimismo permite hacer girar el haz alrededor del tubo mediante conmutación de los grupos de elementos excitados y, por consecuencia, sustituir la rotación mecánica de los sensores, anteriormente descrita, por un barrido electrónico (FR-A-2796153).

35 Es un caso particular de inspección el de los tubos sin soldadura, obtenidos por "perforación" en caliente de barras entre cilindros. Este procedimiento de fabricación trae consigo unos defectos llamados "oblicuos" o también en hélice, los cuales presentan una cierta oblicuidad respecto al eje del tubo. Esta oblicuidad puede ser positiva o negativa, según el sentido de la hélice.

La oblicuidad de los defectos depende de la gama de fabricación que se pone en práctica y, en ciertos casos, del estadio de formación del defecto. Así es como una misma instalación de inspección puede tener que inspeccionar entonces defectos cuya oblicuidad es susceptible de variar entre $- 20^\circ$ y $+ 20^\circ$, e incluso más.

40 Ahora bien, la más mínima oblicuidad induce una fuerte atenuación de los ecos reflejados por los defectos cuando la incidencia del haz se ha optimizado para detectar defectos estrictamente longitudinales.

La solicitud de patente EP 0 841 580 A2 describe un aparato de prueba ultrasónica de acoplamiento directo según el preámbulo de la reivindicación independiente 1.

45 La patente US 3 924 453 describe unos sensores tradicionales que hacen divergir mecánicamente el haz ultrasónico en un plano pasante por el eje del tubo (procedimiento llamado del "divergente tórico"). El intervalo de oblicuidad detectable es, no obstante, limitado.

Por otro lado, la utilización de sensores multielemento que permiten crear un haz ultrasónico, cuya deflexión está adaptada para detectar una oblicuidad de defecto dado, permite, en teoría solucionar este problema. Conviene regular entonces cada disparo de manera que a cada disparo le corresponda una incidencia óptima para una oblicuidad dada.

50 Cada disparo implica un tiempo de propagación por el agua a la ida, un tiempo de propagación (una ida y

5 vuelta, o varias) por el tubo y, nuevamente, un tiempo de propagación por el agua a la vuelta. Si bien es concebible multiplicar los disparos en función del número de incidencias deseadas, de hecho, esta técnica difícilmente es aplicable industrialmente, en particular a causa de las duraciones de propagación acumuladas, las cuales la multiplicación de disparos hace prohibitivas. Estas duraciones de propagación acumuladas son características físicas que no pueden disminuir en el tiempo.

La invención viene a mejorar la situación, aumentando la productividad de la instalación de inspección, al propio tiempo que conserva una buena detectabilidad de los defectos, en particular de los defectos oblicuos respecto al eje del tubo.

10 A tal efecto propone una instalación de inspección no destructiva para productos metalúrgicos, en particular con acoplamiento indirecto, la cual comprende:

- un dispositivo sensor de ultrasonidos que comprende un conjunto de elementos transductores ultrasónicos (Ci), accesibles selectivamente,
- un circuito de aguas arriba, adecuado para excitar selectivamente los elementos transductores en instantes elegidos,
- 15 - un circuito de aguas abajo, adecuado para recoger las señales captadas de vuelta por los elementos transductores, y
- un componente de procesamiento (el cual puede ser incorporado al circuito de aguas abajo) adecuado para analizar las señales captadas, en calidad de respuesta global de un producto metalúrgico a una excitación ultrasónica.

20 De acuerdo con una característica de la instalación:

- el circuito de aguas arriba está establecido para operar por disparos, asociados a una misma ley temporal de excitación de los elementos transductores,
- el circuito de aguas abajo comprende una memoria y está establecido para guardar unas muestras de las señales captadas (Sij) por cada elemento transductor, en correspondencia con cada disparo, en una profundidad temporal elegida, y
- 25 - el componente de procesamiento es apto para cooperar con esa memoria con el fin de:
 - * para cada disparo, leer y sumar repetitivamente unos grupos de muestras (Sij) correspondientes a diferentes elementos transductores (Ci), así como a instantes (tj) desplazados de un elemento a otro, y ello según una ley temporal elegida de procesamiento, adecuada para cada repetición, lo cual permite calcular para cada disparo una pluralidad de respuestas reconstituidas (S_T, α_T) de las que cada una corresponde a una deflexión α_T (multiprocesamiento), y
 - * analizar la respuesta global constituida por el conjunto de estas respuestas reconstituidas,
- 30 y los elementos transductores ultrasónicos (Ci) son de divergencia (δ) al menos igual al ángulo máximo de deflexión, para las diferentes respuestas reconstituidas.

35 Así, partiendo de un sólo disparo, se puede deducir una pluralidad de respuestas ultrasónicas correspondientes cada una de ellas a una incidencia "simulada", elegida *a posteriori*.

De acuerdo con una de las ventajas que procura la presente invención, la rapidez del análisis de los productos metalúrgicos no está limitada por tanto más que en los tiempos necesarios de procesamiento.

40 En una realización ventajosa, el circuito de aguas abajo comprende un bloque de digitalización de las señales captadas y la memoria está establecida para cooperar con el bloque de digitalización a efectos de almacenar, en función, por una parte, de instantes sucesivos y, por otra parte, de elementos transductores activos, las amplitudes de las señales captadas por cada elementos transductor.

45 En un modo de realización, el circuito de aguas abajo comprende unos medios de cálculo capaces de definir un reparto de retardos que respectivamente han de aplicarse a las señales captadas para obtener una respuesta global que corresponde a una emisión según una deflexión de haz elegida.

Ventajosamente, los medios de cálculo están establecidos además para tener en cuenta unas características de emisión de los elementos transductores, tales como la convergencia de los haces emitidos por cada elemento, en la definición del reparto de los retardos que han de aplicarse.

La invención es susceptible de diferentes variantes, en particular las siguientes, las cuales pueden ser combinadas:

- 5 - con cada disparo de emisión, la ley temporal de excitación puede no incorporar ningún desfase entre los elementos transductores; también puede incluir tales desfases; aún se pueden prever ambos, es decir, un disparo sin desfase y uno o unos disparos con desfases, siempre que se conserve el multiprocesamiento de cada disparo.
- 10 - el o los disparos con desfases pueden servir para facilitar la definición *a posteriori* (en el multiprocesamiento) de grandes deflexiones de haz, para las cuales se debería tomar en cuenta la atenuación de las ondas ultrasónicas.
- 15 - se prevé un movimiento relativo helicoidal entre los tubos y el dispositivo sensor de ultrasonidos, desplazando el tubo, o el sensor, o ambos.
- 20 - el sensor puede ser unidimensional, es decir, una barra lineal de elementos transductores, dispuesta sensiblemente paralelamente al eje de desplazamiento de los tubos, o bien una barra al menos parcialmente arqueada (por ejemplo en tronco de cilindro, o en tronco de sector de cilindro), la cual rodea el tubo.
- 25 - el componente de procesamiento puede hallarse establecido para procesar las señales de retorno por grupos diferenciados de elementos de la barra. Ello constituye cada vez un "sensor virtual", con ayuda de un subconjunto de elementos transductores del sensor. Así, se hace disparar simultáneamente al conjunto de los elementos del sensor, en tanto que con cada disparo se analizan *a posteriori* las señales recibidas por los diferentes sensores virtuales, para una (o cada) ley de desfase deseada.
- 30 - el dispositivo sensor de ultrasonidos puede comprender una red bidimensional de elementos transductores (no necesariamente plana). Se pueden distinguir en ella columnas y filas. Las columnas y / o las filas pueden ser utilizadas como el sensor unidimensional antedicho. Tal red bidimensional de sensores es llamada "mosaico".
- 35 - el sensor de mosaico puede servir para detectar los defectos oblicuos, sin necesidad de un desplazamiento relativo helicoidal físico. En efecto, este permite una "rotación electrónica" del haz. Se entiende por rotación "electrónica" un procesamiento de diferentes sensores virtuales, que sea adecuado para barrer la circunferencia de los productos (realizándose de ser necesario el complemento de rotación, al menos parcialmente, mediante desplazamiento físico). El circuito de aguas abajo está establecido entonces para calcular repartos de retardos, a un tiempo entre los elementos de una misma fila y entre los elementos de una misma columna.

Otras características y ventajas de la invención se irán poniendo de manifiesto conforme se examine la descripción detallada que sigue, así como los dibujos que se acompañan, en los cuales:

- 35 la figura 1 representa un tubo T que presenta un defecto oblicuo D;
- la figura 2A representa un dispositivo de inspección con ultrasonidos, con una incidencia elegida en un plano de sección longitudinal del tubo T que pasa por el eje del mismo;
- la figura 2B representa un dispositivo de inspección por ultrasonidos con una incidencia elegida, en un plano de sección transversal del tubo T;
- 40 la figura 3 representa esquemáticamente unos sensores C_i y los retardos τ_i que han de aplicarse para crear una desviación α , *a priori*, de un rayo de ultrasonidos R1;
- la figura 4 representa un diagrama que muestra las incidencias de haz de ultrasonidos que han de aplicarse para una oblicuidad β de un defecto presente dentro de un tubo;
- 45 la figura 5 representa un disparo ultrasónico, con una columna de agua CE en la cual se materializa la interfase entre el sensor C y el tubo T, recorriendo este tiro ultrasónico primero el agua y luego el metal del tubo T;
- la figura 6 representa esquemáticamente una instalación para la detección de defectos, en el sentido de la presente invención;
- la figura 7 representa esquemáticamente la divergencia δ de un haz F1 que emite un sensor de ultrasonidos C, de anchura dada L;

- la figura 8 representa esquemáticamente las intensidades seleccionadas en las señales recibidas, sin tener en cuenta una focalización aplicada al haz de ultrasonidos (sombreado vertical) y teniendo en cuenta esta focalización (sombreado horizontal);
- 5 la figura 9 representa un diagrama de las duraciones globales de propagación de las ondas ultrasónicas y de las duraciones de cálculo (ordenadas en microsegundos) en función del número de oblicuidades de defectos que pueden ser detectadas (en abscisas), según la técnica del estado de la técnica anterior (línea de trazo discontinuo corto y largo) y según la invención (línea de trazo continuo) y mediante un procedimiento optimizado, en el sentido de la presente invención (trazos discontinuos);
- 10 la figura 10 representa la amplitud de una señal recibida (a partir de un haz inicial no desviado) para varias oblicuidades β de un defecto detectado con un sensor según la figura 6 y un sensor estándar utilizado en una técnica tradicional (curvas en línea de puntos);
- 15 las figuras 10B y 10A son sendas curvas de señales A-SCAN obtenidas sobre defectos oblicuos, respectivamente mediante una técnica según la invención y mediante una técnica de disparos desmultiplicados del estado de la técnica;
- la figura 11 representa la pérdida de sensibilidad (por atenuación acústica) para grandes oblicuidades perseguidas, con la técnica de disparos desmultiplicados (curva con trazo continuo) y la técnica de disparo único según la invención (curva en línea de puntos); y
- 20 la figura 12 representa un dispositivo de inspección con ultrasonidos, en una realización que utiliza un sensor en arco;
- la figura 13 representa un dispositivo de inspección con ultrasonidos, en una realización que utiliza un sensor de "mosaico";
- 25 la figura 14 representa la respuesta de una entalladura en función de las posiciones relativas de la entalladura y de la barra, para unos sensores virtuales yuxtapuestos y compuestos de 8 elementos; y
- la figura 15 representa la respuesta de una entalladura en función de las posiciones relativas de la entalladura y de la barra, para unos sensores virtuales imbricados al 50 % y compuestos de 8 elementos.

30 Los dibujos y la subsiguiente descripción contienen, en lo fundamental, elementos de índole inequívoca. Por lo tanto, podrán no sólo servir para hacer comprender mejor la presente invención, sino también contribuir a su definición, si es el caso.

35 Se hace referencia en primer lugar a la figura 1, en la cual un tubo T a la salida de una cadena de fabricación presenta un defecto oblicuo D, de oblicuidad β respecto al eje longitudinal del tubo. Particularmente, en un procedimiento de fabricación de tubos, sin soldadura, en el cual se perforan en caliente unas barras metálicas entre cilindros, en ocasiones los tubos T presentan tales defectos, en hélice, con una determinada oblicuidad β respecto al eje del tubo T.

40 Haciendo referencia a la figura 2A, un dispositivo de inspección no destructiva de tubos T comprende un dispositivo sensor C, constituido a partir de uno o varios elementos transductores ultrasónicos, el cual «insonifica» el tubo T por emisión ultrasónica, a una cadencia de disparo, llamada frecuencia de recurrencia, por ejemplo cercana a 4 KHz. En principio, el acoplamiento entre el sensor de ultrasonidos y el tubo metálico T es indirecto. Entre el sensor C y el tubo, se genera una columna de líquido, en concreto agua, de modo que las ondas ultrasónicas que el sensor emite se propagan en primer lugar por el agua y luego por el tubo.

45 La incidencia del haz de ultrasonidos emitido por los sensores C se puede definir, en el espacio, mediante dos ángulos de incidencia. Haciendo referencia a la figura 2A, un rayo incidente R1 determina con una normal del tubo N un ángulo α_T (deflexión axial o longitudinal) en un plano de sección longitudinal del tubo T, plano éste que comprende el eje del tubo. El segundo ángulo que permite definir una incidencia del haz es el ángulo α_L de la figura 2B. El rayo R1 que emite el sensor C determina un ángulo α_L , respecto a la normal N del tubo T. Este ángulo α_L (deflexión transversa) se define en un plano de sección transversal, perpendicular al eje del tubo T.

50 El defecto D se sitúa en principio sobre la superficie exterior o interior del tubo T o en las proximidades de esas superficies. Comprende éste una componente longitudinal, así como una componente transversal, cuya proporción es función del ángulo β del defecto. Esta oblicuidad β se define con relación a una generatriz del tubo cilíndrico T, paralela al eje del tubo y puede ser positiva o negativa.

El propio tubo generalmente presenta un movimiento helicoidal relativo con relación al sensor C en orden a inspeccionar sensiblemente la totalidad de la superficie del tubo. A lo largo del eje del tubo, la componente del movimiento helicoidal relativo es rectilínea, a velocidad sensiblemente constante que puede llegar a aproximadamente 1 metro / segundo. La componente giratoria del movimiento helicoidal relativo puede ser originada mediante la rotación del sensor alrededor del eje del tubo o mediante una rotación del tubo alrededor de su eje, hallándose fijo el sensor, o también mediante una combinación de estas dos rotaciones. En ambos casos, se orienta el sensor para que dispare sobre el tubo según una deflexión transversa α_L cercana a 17° para detectar los defectos longitudinales o según una deflexión axial α_T cercana a 17° para detectar defectos transversales. Estas deflexiones α_L y α_T presentan diferentes valores para un medio de propagación distinto al agua y para tubos de material distinto al acero. La orientación puede ser preestablecida (no ajustable) o ajustable mecánicamente en cierta medida, pero el ajuste es largo y delicado.

En una técnica reciente, más evolucionada, se utiliza una pluralidad de elementos transductores C_i (figura 3), cuya normal es perpendicular al tubo. Se aplica a los elementos transductores unos respectivos retardos de emisión τ_i , en orden a crear un desfase entre las respectivas ondas elementales emitidas O_i , lo cual redundaría en una diferencia de marcha entre las respectivas ondas emitidas R_i . El haz que resulta del conjunto de las ondas emitidas presenta entonces una energía máxima según una deflexión α , gestionada electrónicamente mediante el mando del instante de emisión de los elementos C_i . Así es como el conjunto de los retardos aplicados τ_i define un reparto de los retardos, llamado ley de fase o ley temporal, en la red de sensores C_i y, consecuentemente, la deflexión α del haz de emisión resultante de las diferentes ondas emitidas R_i .

Los elementos transductores van dispuestos sobre una barra. Conociendo el paso p_e entre cada elemento C_i , se puede construir el reparto de los retardos que han de aplicarse a la emisión sobre los diferentes elementos (ley de fase) para una deflexión α dada, a partir de la fórmula (1):

$$\sin \alpha = V \cdot dt / p_e,$$

en la cual dt es el retardo que ha de aplicarse entre los dos elementos consecutivos y v corresponde a la velocidad de una onda longitudinal ultrasónica en el agua ($V = 1490 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). El haz así formado y deflectado en α llega hasta el tubo según la incidencia α , en otras palabras, el ángulo de incidencia sobre el producto es prácticamente el ángulo de deflexión del haz.

Para escuchar la señal de manera óptima, es decir, en la dirección de la incidencia de emisión, se aplica la misma ley de fase a las señales reflejadas por un defecto y recibidas de vuelta por los diferentes elementos C_i .

Se puede excitar asimismo sucesivos grupos de elementos C_i para realizar un barrido electrónico, por ejemplo alrededor del tubo, si los elementos C_i van en arco de círculo o equivalente.

Con carácter general, los defectos oblicuos son difíciles de detectar al mismo tiempo que los defectos longitudinales, especialmente porque una incidencia optimizada del haz de ultrasonidos para la inspección de los defectos largos produce una respuesta fuertemente atenuada sobre los defectos oblicuos, incluso escasamente oblicuos. Por ejemplo, la atenuación generalmente sobrepasa un factor 2, para una oblicuidad de defecto de 5° . Ahora bien, en el presente caso se pretende detectar simultáneamente los defectos longitudinales y oblicuos (de ser posible, con una oblicuidad comprendida entre $+35^\circ$ y -35° como mínimo, sin pérdida redhibitoria de sensibilidad).

La detección de los defectos oblicuos precisa entonces adaptar los ángulos α_L y α_T , los cuales varían con la oblicuidad de un defecto. Efectivamente, haciendo referencia a la figura 4, se revela que lo óptimo para detectar un defecto longitudinal ($\beta = 0$) corresponde a 17° para el ángulo α_L , en tanto que el ángulo α_T es nulo. Estos valores de α_L y α_T se invierten, naturalmente, para una oblicuidad del defecto de 90° (defecto transversal). Por ejemplo, para una oblicuidad β de 45° , los ángulos α_L y α_T corresponden a unas deflexiones de aproximadamente 12° , en un plano transversal y en un plano longitudinal (figura 2A y figura 2B), respectivamente.

De hecho, para oblicuidades inferiores a 30° , las variaciones del ángulo α_L son relativamente pequeñas y pueden despreciarse (variación de 3° de ángulo como máximo en el principio del decrecimiento de α_L en función de la oblicuidad β). En cambio, la introducción de un ángulo α_T permite detectar los defectos oblicuos, con una oblicuidad inferior a 30° en valor absoluto.

Así, cuando se pretende detectar los defectos oblicuos, se impone fijar el valor de α_L en 17° y hacer variar α_T en el plano de sección longitudinal del tubo T, por ejemplo en un margen de campo de acción comprendido entre -10° y $+10^\circ$ para detectar las diferentes oblicuidades posibles, incluyendo la oblicuidad nula (defectos longitudinales).

Para detectar los defectos oblicuos, la patente US3924453 propone un procedimiento óptico (llamado de divergente tórico) que consiste en hacer divergir el haz, por medio de una lente, en el plano longitudinal del tubo y, al contrario, en focalizar ese haz en el plano perpendicular (plano de la figura 2B). Así se accede a un campo de

detección, relativamente limitado, del orden de 10 ° alrededor de una oblicuidad perseguida (- 10 ° < α_T < + 10 °). Más aún, ese procedimiento presenta el inconveniente de una sensibilidad variable según la oblicuidad. Por tanto, se pueden detectar imperfecciones que serían aceptables y dejar pasar defectos inaceptables.

5 Otro procedimiento según la presente invención consiste en crear un haz deflectado en un ángulo α_T por medio de un sensor en forma de barra que incorpora una multiplicidad de elementos transductores, mientras que el ángulo α_L se fija mediante la configuración de la celda (preferiblemente cercano a 17 °).

Haciendo referencia a la figura 7, un sensor C emite en efecto un haz F1 de ultrasonidos, cuyo borde extremo determina, con la normal al sensor C, un ángulo δ, llamado ángulo de divergencia (o de apertura). La divergencia δ viene dada por la fórmula (2):

10
$$\sin \delta = 1,22 \lambda / L ,$$

donde λ es la longitud de onda del haz en el agua y L la anchura de un elemento transductor del sensor (figura 7). En cualquier caso, la divergencia no deja de ser superior al ángulo α_T máximo (11 °) para detectar oblicuidades de β = 30 °.

Se utiliza ventajosamente esta divergencia para lograr los valores α_T que interesan.

15 Por ejemplo, para unos ultrasonidos emitidos en el agua a 5 MHz con unos elementos Ci de 1,4 mm de ancho de una barra lineal, δ equivale aproximadamente a 15 °.

Utilizando una ley de fase apropiada para la emisión de los elementos Ci según la fórmula (1) y la figura 3, se puede crear un haz deflectado en un ángulo α_T, mientras el valor de α_T sea inferior a la divergencia δ dada por la fórmula (2). Cabe entonces la posibilidad de regular "electrónicamente" α_T, modificando la ley de fase, sin que sea necesario orientar el sensor en esa dirección. Se aplica entonces la misma ley de fase a las señales recibidas de vuelta y se suman las señales recibidas de vuelta desfasadas de este modo para obtener una respuesta global aumentada al máximo.

20

Este procedimiento, contemplado por la firma solicitante, permite perseguir una oblicuidad dada, con una sensibilidad correcta y conocida, y contar con una respuesta homogénea para las diferentes oblicuidades posibles de los defectos del tubo. La tabla del anexo A1 contiene los resultados de los ensayos preliminares de deflexión α_T del haz a efectos de detectar los defectos oblicuos (procedimiento multidisparo).

25

Más precisamente, esos resultados se centran en la amplitud de los ecos obtenidos de vuelta para diferentes oblicuidades de defectos y diferentes valores de deflexión α_T del haz y en los valores de ganancia de amplificación de las señales. Los valores indicados en negrita corresponden a los valores de deflexión que han de utilizarse para detectar una oblicuidad dada. Se observa que los resultados obtenidos para las ganancias de amplificación son satisfactorios (23,5 dB para la entalladura a 25 °).

30

Se puede, además, compensar la variación de sensibilidad de detección en función de la deflexión utilizada y, por lo tanto, realizar una sensibilidad uniforme de detección de defectos sea cual sea su oblicuidad.

En cambio, para cada oblicuidad perseguida, es necesario efectuar un disparo en grupo de los elementos transductores del sensor. Así, si se buscan varias oblicuidades de defectos, se tiene que prever un mismo número de disparos de ultrasonidos, puesto que para cada oblicuidad perseguida se tiene que prever una ley de retardo específica de la emisión y de la recepción.

35

Haciendo referencia a la figura 5, un disparo ultrasónico R1 se compone de un recorrido por el agua T_e, seguido por un recorrido por el tubo T_m (recorrido útil), siendo estos recorridos de duraciones proporcionales al espesor de los materiales traspasados. Por motivos acústicos, la columna de agua CE que baña la interfase entre el sensor C y el tubo T es tal que el tiempo de recorrido por el agua es superior al tiempo de recorrido por el metal del tubo.

40

En particular, el tiempo total de un disparo ultrasónico T_t viene dado por la relación:

$$T_t = T_e + T_m, \text{ con } T_e > T_m .$$

45 En la aplicación a la detección multidisparo de los defectos oblicuos, si n es el número total de oblicuidades perseguidas, el tiempo total T_t pasa a ser:

$$T_t = n \cdot (T_e + T_m)$$

Para las tradicionales cadencias de disparos industriales (cercanas a 4 KHz para efectuar una mera inspección de los defectos longitudinales), no pueden detectarse más que aproximadamente una o dos oblicuidades, además de los defectos longitudinales mediante la técnica de los disparos múltiples en el caso de tubos relativamente espesos (aproximadamente 36 mm de espesor), habida cuenta de los tiempos de propagación de los haces ultrasónicos.

La detección de los defectos oblicuos, en el sentido de la presente invención, se basa en un principio todavía diferente.

De acuerdo con la invención, se gobiernan los elementos transductores Ci de una barra lineal dispuesta paralelamente al eje del tubo de modo que, en emisión, todos los elementos son activados al mismo tiempo (sensiblemente sin desfase). En otras palabras, la "deflexión física en emisión" es nula. En cambio, se construye sobre las señales de retorno una deflexión "virtual" del haz, desplazando los instantes en los cuales se suman las señales recibidas, para cada elemento Ci.

Haciendo referencia a la figura 6, los elementos transductores Ci del sensor se establecen, en el ejemplo descrito, según una barra 3. Esta barra es fija en la instalación de inspección y su dirección general es paralela al eje del tubo T que ha de inspeccionarse. Esta barra está inclinada un ángulo α_L cercano a 17° respecto a la normal al tubo en un plano de sección transversal del tubo T (plano de la figura 2B) y el tubo T está animado de un movimiento helicoidal a lo largo de su eje. Este ángulo α_L de 17° corresponde al ángulo óptimo α_L para la detección de defectos de pequeña oblicuidad (β inferior a aproximadamente 30°).

Los elementos Ci son excitados por un circuito de mando 1 para emitir cada uno de ellos una onda ultrasónica pulsante Ri de frecuencia ultrasónica del orden de 5 MHz. Preferiblemente, los elementos Ci son gobernados de modo que emitan al mismo tiempo, es decir, sensiblemente sin desfase. Las ondas ultrasónicas reflejadas por un defecto y captadas de vuelta por cada elemento Ci son convertidas en señales eléctricas Si(t). Estas señales analógicas Si(t) son respectivamente convertidas mediante unos convertidores analógico / digitales 2, los cuales funcionan por ejemplo a 10 veces la frecuencia ultrasónica, esto es, 50 MHz.

Los convertidores analógico / digitales 2 van conectados a una memoria 4, para almacenar en una profundidad temporal de varias decenas de microsegundos unos datos digitales constitutivos de muestras de señal Sij (por ejemplo en amplitud), asociados respectivamente a unos instantes tj. En la notación Sij, el índice i corresponde a un identificador de elemento Ci en la barra 3, en tanto que el índice j corresponde a un identificador de instante tj.

Un módulo de cálculo en la instalación selecciona de la memoria 4 una pluralidad de muestras de señales Sij desplazadas, por una parte, en función del índice i de los elementos Ci y, por otra parte, en función de los sucesivos instantes tj, y suma las muestras de señales desplazadas. La suma puede llevarse a cabo, por ejemplo, en amplitud instantánea, o de cualquier otra manera conveniente.

El recuadro que lleva la referencia 5 en la figura 6 ilustra, a título de ejemplo, la manera en que se efectúan los cálculos así como la estructura de la memoria 4. El órgano 5 se puede considerar como un circuito o componente de procesamiento (o también como un módulo de procesamiento, sin que la palabra módulo implique particularización alguna).

La memoria 4 se ordena preferiblemente en direcciones asociadas a un índice de columna i (correspondiente a los elementos Ci) y a un índice de línea j (correspondiente a los sucesivos instantes tj).

El módulo de procesamiento 5 calcula los retardos dt que han de aplicarse entre sucesivas columnas i, de acuerdo con la fórmula (1), mediante la deflexión α_T :

$$dt = pe.\sin \alpha_T / V$$

Los valores de retardo dt son del orden de varias decenas de nanosegundos.

El módulo de procesamiento selecciona a continuación, con una precisión del orden del nanosegundo, unos valores de Sij, de un conjunto de columnas de elementos Ci, desplazados temporalmente. A continuación efectúa la suma de esas muestras en cada instante tj, para definir una señal de respuesta reconstruida para la deflexión α_T :

$$S_{(ij)}(\alpha_T) = S_{1,j} + S_{2,j+2dt} + S_{3,j+4dt} + \dots + S_{n,j+2(n-1)dt}$$

Tal suma permite volver a poner en fase a nivel de los elementos transductores unas señales emitidas en el mismo momento que han experimentado recorridos con tiempos de recorrido que difieren de dt a la ida y de dt a la vuelta entre dos elementos.

Después de haber calculado el valor de dt de acuerdo con la fórmula (1), se utiliza la suma anteriormente efectuada para aumentar al máximo la energía del haz en la dirección de la deflexión α_T .

5 La tabla del anexo A2 incorpora los resultados de ensayos de deflexión α_T del haz para detectar los defectos oblicuos, mediante el procedimiento de la presente invención. Esta permite determinar los valores de doble deflexión ($2\alpha_T$) correspondientes a los desfases (2dt) en la ida y en la vuelta. Para diferentes oblicuidades, el valor ($2\alpha_T$) que ha de utilizarse corresponde a los valores de amplitudes indicados en negrita en la tabla. Esta tabla proporciona asimismo los valores de ganancia para los diferentes valores de α_T . Estos valores son aceptables incluso para grandes valores de α_T .

10 En cuanto antecede, se ha considerado una diferencia de tiempo dt constante entre los instantes sucesivos t_j , lo cual corresponde a una ley de retardos lineal NF (figura 8) con dt constante. Esta ley, sin embargo, no tiene en cuenta una focalización que es susceptible de aplicarse al haz de ultrasonidos sobre el tubo. Para tener en cuenta esta focalización en la ley de retardos, el desfase dt decrece hasta un mínimo y luego crece hasta el valor inicial. Haciendo referencia a la figura 8, las intensidades S_{ij} seleccionadas determinan, para un tiempo t_j , en la matriz 5 de columnas C_i y de filas t_j , una línea FOC curva.

15 Los medios de procesamiento permiten calcular una respuesta reconstruida para diferentes ángulos de deflexión α_T .

20 El módulo 6 de la instalación recupera las señales de respuestas reconstituidas $St(\alpha_T)$ para conformar una señal directamente utilizable por un dispositivo de visualización 7 (pantalla de visualización u otro). El dispositivo 7 representa entonces una señal llamada "A-SCAN" que incorpora unos impulsos de ecos ultrasónicos reconstruidos en función del tiempo y para una o varias deflexiones elegidas α_T .

De acuerdo con una de las ventajas que procura la presente invención, el tiempo total T_t para perseguir n oblicuidades, con las notaciones empleadas anteriormente, viene dado entonces por:

$$T_t = T_e + T_m + n \cdot T_{calc},$$

siendo T_{calc} el tiempo de cálculo que puede expresarse en función de T_m , de donde

25
$$T_t = T_e + n \cdot G \cdot T_m,$$

donde G es un coeficiente que representa la velocidad de procesamiento por parte de la cadena que comprende los convertidores analógico / digitales, la memoria 4, la selección de las intensidades en el juego de intensidades almacenadas, etc. Así, cuanto más pequeño sea G, mayor será la velocidad de procesamiento.

30 De acuerdo con una de las ventajas que procura la presente invención, se suprime de este modo el tiempo de recorrido en el agua para (n - 1) oblicuidades.

Con los actuales medios electrónicos e informáticos, G es siempre inferior a 1 y puede ser inferior a 0,5 con electrónicas ultrarrápidas. Así, las limitaciones ya no son acústicas sino electrónicas, pues el factor limitador pasa a ser, en la presente invención, el tiempo de cálculo que precisan los procesamientos arriba indicados. Las limitaciones ya no son entonces físicas sino evolutivas con los progresos en la rapidez de los circuitos electrónicos.

35 La figura 9 representa, para un espesor dado del tubo, las duraciones totales T_t para la detección de los defectos oblicuos, en función del número de oblicuidades inspeccionadas n. Este gráfico se establece utilizando la técnica del estado de la técnica con desmultiplicación de los disparos (desfase entre los elementos C_i , desde la misma emisión, para cada deflexión α_T , lo cual corresponde a la curva en trazo discontinuo largo y corto). Se utiliza asimismo la técnica según la invención con un factor G de 1 (curva con trazo continuo) relativa a una electrónica estándar y con un factor G de 0,5 (curva en línea de puntos) relativa a una electrónica ultrarrápida.

40

Se advierte así que cuanto menor sea el factor G, más corto será el tiempo necesario para perseguir varias oblicuidades, lo cual permite aumentar la velocidad de inspección de los tubos, particularmente en una cadena de inspección de tubos a la salida de mecanizado.

45 El dispositivo sensor presenta una longitud adaptada al paso de inspección de la instalación, esto es, una longitud del orden de 100 mm en el ejemplo. Ahora bien, los defectos que han de detectarse presentan una longitud que puede ser netamente menor, por ejemplo de 20 mm. Un defecto de 100 mm de longitud, esto es, de longitud equivalente a la barra (3), crea una señal sobre cada uno de los elementos de la barra y, por tanto, una señal reconstituida intensa, mediante suma. En cambio, un defecto de 20 mm crea una señal sobre el 20 % de los elementos de la barra y, por tanto, una señal reconstituida 5 veces menos intensa que aquélla para un defecto de

50 100 mm.

Una imperfección de 100 mm de largo no redhibitoria podrá ser detectada y un defecto de 20 mm, poco o no detectada.

5 Para compensar este inconveniente, se utiliza una solución que consiste en efectuar el procesamiento tan sólo sobre algunos elementos de la barra, para un mismo disparo de todos los elementos de la barra. Por ejemplo, se puede efectuar el procesamiento sobre una ordenación de 8 elementos de una barra de 64 elementos, y comenzar nuevamente el procesamiento sobre otras ordenaciones de 8 elementos de la barra. El grupo de los 8 elementos recibe el nombre de "sensor virtual".

10 Cada ordenación provee realmente, después de la suma de las señales S_{ij} sobre los 8 elementos, una señal de respuesta reconstituida elemental para la deflexión α_T . Se puede conservar como respuesta reconstituida global la señal reconstituida elemental, de entre las señales reconstituidas de las diversas ordenaciones, la cual presenta una amplitud de pico máxima. Cada ordenación de elementos de "sensor virtual" se deduce de la anterior por translación de un paso p_i , llamado paso de imbricación.

15 Sea N_T el número total de elementos de la barra y N_v el número de elementos transductores del sensor virtual. Cuando el paso de imbricación está comprendido entre 1 y N_v , permaneciendo estrictamente inferior a N_v , hay solapamiento o imbricación de las ordenaciones del sensor virtual. Cuando el paso de imbricación p_i es igual a N_v , las ordenaciones del sensor van dispuestas una al lado de la otra. Cuando el paso de imbricación es superior a N_v e inferior a N_T , las distintas ordenaciones no realizan un cubrimiento total de los elementos del sensor.

Se efectúa un número máximo de veces el procesamiento de las señales sobre los N_v elementos del sensor virtual. El número de posibles ordenaciones viene dado por la fórmula (3):

20
$$N = \text{truncamiento} \left\{ \left(\frac{N_T - N_v}{p_i} \right) + 1 \right\}$$

Por ejemplo,

- si $N_T = 64$, $N_v = 8$ y $p_i = 1$, entonces $N = 57$. En este caso, dos ordenaciones sucesivas tienen 7 elementos en común,
- 25 - si $N_T = 64$, $N_v = 8$ y $p_i = 8$, entonces $N = 57$. En este caso, dos ordenaciones sucesivas no tienen ningún elemento común,
- si $N_T = 64$, $N_v = 8$ y $p_i = 4$, entonces $N = 57$. En este caso, dos ordenaciones sucesivas tienen 4 elementos en común, lo cual corresponde a un recubrimiento del 50 % de las sucesivas ordenaciones.

30 Después de haber conservado, como respuesta reconstituida global de las N ordenaciones, aquella que presenta una amplitud máxima de pico para la deflexión α_T buscada, se puede igualmente efectuar los cálculos para otros valores de la deflexión α_T .

Como variante, se pueden determinar primero las diferentes señales de respuesta reconstituida elemental para diferentes ángulos α_T y una ordenación de sensor virtual y efectuar seguidamente los mismos cálculos para las demás ordenaciones.

35 Se determinará, en todos los casos, la respuesta reconstituida global para una deflexión dada, conservando la respuesta elemental que proporciona, para esa deflexión, una amplitud de pico máxima.

Cuando se procesan las ordenaciones de sensores virtuales que están situadas en los extremos de la barra, la señal de respuesta se ve distorsionada por la ausencia de elementos a uno y otro lado del sensor virtual. Esta es la razón por la cual es preferible eliminar $(N_v / 2)$ elementos en cada extremo de la barra de las diversas disposiciones de sensor virtual.

40 El número máximo de disposiciones se reduce entonces a:

$$N = \text{truncamiento} \left\{ \left(\frac{N_T - 2 N_v}{p_i} \right) + 1 \right\}$$

Como muestra la tabla del anexo A2, la señal reconstituida global se amplifica de manera diferente para cada valor de α_T , con el fin de que el rigor de la inspección sea equivalente para los diferentes valores de α_T .

45 Como variante, la ganancia de amplificación podrá ser uniforme, en tanto que el umbral de activación del defecto se adapta a cada valor α_T .

La firma solicitante efectuó ensayos "estáticos" de inspección de defectos oblicuos, sobre un tubo de acero, de 96 mm de diámetro y de 12 mm de espesor. Se formaron entalladuras de aproximadamente el 5 % del espesor

del tubo para simular unos defectos oblicuos. La oblicuidad de las entalladuras está comprendida entre 0° y 25° y su longitud en sentido longitudinal es de aproximadamente 12 mm.

5 Los sensores utilizados son comercializados por la sociedad Imasonic bajo la denominación Imasonic (marca registrada). El paso pe entre los elementos es de 1,5 mm (con 1,4 mm de anchura L para un elemento). El dispositivo comprende un total de 32 elementos, con una focalización mecánica de 50 mm en el agua. En un ejemplo de celda utilizada, la deflexión α_L se puede fijar mecánicamente en 17° . La electrónica puesta en práctica es una electrónica de marca RDTech de tipo Focus 32 / 128 capaz de gestionar 32 elementos en paralelo.

10 Habida cuenta de la geometría de los elementos transductores, su divergencia δ es del orden de 15° y está en todo adaptada a los valores de deflexión que han de ponerse en práctica para detectar defectos oblicuos para una oblicuidad comprendida entre -25° y $+25^\circ$.

Los ensayos estáticos se efectuaron partiendo de un sensor virtual de 8 elementos para analizar la señal de vuelta. El defecto se halla dispuesto en la perpendicular al sensor virtual. Tal sensor virtual presenta una longitud de escucha de 9 mm aproximadamente, perfectamente adaptada a la longitud del defecto estudiado (12 mm).

15 Haciendo referencia a la figura 10, la atenuación de la respuesta de una entalladura en función de su oblicuidad (0° , 5° ó 10°) es menor que la que se obtiene con sensores tradicionales de un sólo elemento de anchura cercana a 10 mm. Normalmente, para un sensor tradicional, la atenuación es de al menos 5 dB para una entalladura de 5° , mientras que los sensores utilizados en el presente caso experimentan una atenuación inferior a 1 dB, para la misma oblicuidad de entalladura.

20 Sin embargo, para unas oblicuidades β superiores a $+20^\circ$ o inferiores a -20° (figura 11), la firma solicitante constató una sensibilidad un tanto menor, en las señales de respuesta reconstituida (instalación según la invención), con relación al caso en el cual se utilizase una instalación multidisparo, con el mismo tipo de barra y con, en cada ocasión, un disparo oblicuo según la oblicuidad preferente que se persiga, lo cual da un "trayecto emisión-recepción adaptado".

25 De hecho, en la instalación según la invención, no hay envío sobre el defecto de un haz deflectado *a priori* (en emisión) en el ángulo α preferente, tal como se puede hacer en una instalación multidisparo; la invención procede solamente mediante reposición en fase de las señales recibidas, a su llegada a los elementos transductores. Esas señales recibidas comprenden la componente reflejada (exactamente, "retrodifundida") por el defecto; y es la reposición en fase la que permite reconstituir la respuesta elemental, y luego la respuesta global, para una deflexión α_T dada.

30 Pero esta reposición en fase en recepción se centra en señales que no han sido objeto de una correspondiente puesta en fase en emisión. De ello se deriva que ésta se centra en unas señales recibidas que no han experimentado exactamente el "trayecto emisión-recepción adaptado". Por regla general, los ensayos conducidos por la firma solicitante mostraron que, en las habituales condiciones operativas, la atenuación relativa (de un elemento sensor a otro) que se deriva de esta diferencia de trayecto era suficientemente pequeña para permanecer despreciable, cuando menos en un cierto intervalo de oblicuidades.

35 La ganancia que ha de ponerse en práctica en la instalación según la invención no es, con todo, redhibitoria y, además, la ganancia de productividad de inspección para varias oblicuidades contrarresta ampliamente el inconveniente sobre la menor sensibilidad.

40 Las figuras 10A y 10B muestran un registro A-SCAN de un mismo defecto de 20° de oblicuidad, respectivamente en una instalación multidisparo y en una instalación con procesamiento llamado de "post-adquisición" según la invención. Las figuras 10A y 10B muestran que los dos tipos de instalación permiten paralelamente detectar el defecto oblicuo a 20° ; en estas figuras, la señal EI designa el eco de interfase agua / acero y la señal ED designa el eco de defecto. El segmento de la derecha del 30 % de amplitud corresponde al criterio de defecto (puerta temporal e intensidad).

45 La firma solicitante efectuó asimismo unos ensayos dinámicos para determinar en particular las zonas útiles de detección de los sensores virtuales. Estos ensayos dinámicos se efectuaron sobre los mismos tubos precedentes, pero con una entalladura de 20 mm de longitud y una oblicuidad $\beta = 0^\circ$ para determinar las lagunas de detección. Así pues, la oblicuidad del defecto no influye en la medida. Los ensayos se realizaron partiendo del mismo material que para los ensayos estáticos y de una celda mecánica de instalación del tipo con ajuste del ángulo α_L . Se optimizó el ángulo α_L en la señal procedente de un defecto longitudinal externo ($\beta = 0^\circ$). La firma solicitante utilizó asimismo una puerta Sofranel 5052GPD con una banda de frecuencias 4 - 12 MHz.

50 Las figuras 14 y 15 muestran la respuesta de la entalladura de 20 mm en función de las posiciones relativas de la entalladura y de la barra de 32 elementos de 48 mm de longitud total, para dos series de ordenaciones de sensor virtual compuesto por 8 elementos.

Para un paso de imbricación $\pi_i = 8$ elementos, las sucesivas ordenaciones inmediatas no se recubren y no se solapan, como en la configuración tradicional con palpadores de 15 mm de diámetro.

5 La figura 14 muestra una zona útil de sensor a -2 dB de 31 mm, esto es, el 65 % de la barra; las lagunas de detección son inferiores a 1,5 dB y presentan una longitud pequeña en modo suficiente para no incidir negativamente en la detección de entalladuras de 25 mm de longitud.

Para un paso de imbricación $\pi_i = 4$ elementos, las sucesivas ordenaciones inmediatas se recubren o se solapan al 50 % . Ya no se observan lagunas de detección, pero el número de ordenaciones y los tiempos de cálculo se ven asimismo duplicados.

10 Los ensayos estáticos y dinámicos efectuados muestran que la instalación con procesamiento post-adquisición según la invención permite detectar los defectos longitudinales comprendidos entre -20° y 20° .

Para lograr unos valores de oblicuidad superiores a 20° , se puede utilizar la instalación y la metodología con procesamiento post-adquisición realizando un desfase en el disparo único de todos los elementos del dispositivo sensor en orden a crear un haz que posea una "deflexión física en emisión" no nula, por ejemplo de 5° .

15 El procesamiento de las señales captadas de vuelta es semejante al procesamiento anteriormente descrito, el cual comprende una memorización de las muestras S_{ij} , una selección de los valores S_{ij} desplazados según una ley de retardo y una suma de esos valores desplazados para cada cálculo de respuesta reconstituida bajo una deflexión α_T . La señal devuelta por el defecto se halla entonces menos atenuada para las fuertes deflexiones α_T acusadas y se pueden explotar mejor las capacidades de divergencia δ de los elementos C_i de la barra.

20 No obstante, este procedimiento presenta ciertos inconvenientes. En efecto, la optimización de la deflexión α_L ya no se efectúa sobre un defecto recto ($\beta = 0^\circ$) sino sobre un defecto de 20° de oblicuidad. Además, este procedimiento no permite detectar las fuertes oblicuidades positivas y negativas, y el desplazamiento de las ordenaciones de sensores virtuales puede ser más compleja por la utilización de disparos con desfase en la emisión.

25 La figura 12 representa otro modo de realización de una instalación según la invención destinada a inspeccionar los defectos longitudinales sobre los tubos. De acuerdo con esta figura, el dispositivo sensor se constituye a partir de una barra lineal en arco de círculo 13 y los diferentes elementos del sensor van dispuestos a lo largo del arco de círculo. Los tubos T que han de inspeccionarse son desplazados a lo largo de su eje y el plano de la barra es perpendicular al eje de los tubos. Se efectúa un disparo en el conjunto de los N_T elementos del sensor, con o sin desfase entre elementos. Se efectúa el mismo procesamiento post-adquisición que el anteriormente descrito para determinar una respuesta reconstituida para una deflexión α_L dada, y para diferentes sensores virtuales en la barra, en orden a realizar por ejemplo una rotación electrónica del haz alrededor del tubo, tal y como se ha indicado más arriba.

30 La figura 13 representa aún otros modos de realización según la invención. En esta figura, el dispositivo sensor va dispuesto sobre una superficie cilíndrica y se constituye a partir de un mosaico o de una red de elementos establecidos en filas paralelas entre sí, por ejemplo 13-1, ...13-i, ...13-n, tal y como se ilustra. En el ejemplo, cada fila es una generatriz de la superficie cilíndrica del sensor. Los tubos que han de inspeccionarse son desplazados a lo largo de su eje coaxialmente a la superficie cilíndrica del sensor.

35 En las figuras 12 y 13, el circuito de mando (o circuito de aguas arriba, para la emisión) se denota por 10 y el conjunto de recepción (o circuito de aguas abajo) se denota por 13.

40 El circuito de aguas arriba 10 está establecido para producir un mismo disparo de todos los elementos transductores, con o sin desfase entre elementos vecinos. En el caso de la figura 13, por ejemplo, se puede realizar un desfase entre filas sucesivas al objeto de crear un haz inclinado de manera óptima en el plano de sección recta de los tubos (deflexión α_L cercana a 17°), pero sin desfase entre elementos de una misma fila, y realizar una rotación electrónica del haz alrededor del tubo utilizando diferentes sensores virtuales.

45 Se efectúa un procesamiento post-adquisición sobre las señales de vuelta memorizadas, según la invención, para reconstituir una señal de respuesta para los ángulos α_L optimizados (aproximadamente 17°) y los ángulos α_T comprendidos entre -5° y $+5^\circ$.

Semejante instalación con sensor de mosaico permite inspeccionar varias oblicuidades de defectos a elevada cadencia (de -20° a 20°) con un avance rectilíneo de los tubos por la instalación, contrariamente a las instalaciones descritas anteriormente que utilizan un avance helicoidal para detectar los defectos oblicuos.

50 También en esta instalación se pueden escoger leyes para deflectar, de manera variable pero elegida, el haz de vuelta siguiendo una sección recta de los tubos o siguiendo un plano longitudinal de los tubos para optimizar los ángulos α_T y α_L (por ejemplo $\alpha_L = 17^\circ$ con $\alpha_T = 0^\circ$, $\alpha_L = 13^\circ$ con $\alpha_T = 11^\circ$).

ES 2 389 355 T3

Es posible utilizar en esta instalación unos sensores virtuales bidimensionales. En tal caso, los sensores son desplazados un paso de imbricación π que presenta una componente axial y una componente circunferencial.

Anexos

A1

Deflexión α_1 (°)	Ganancia (dB)	Amplitud del eco sobre la entalladura según la oblicuidad (%)						
		0	5	10	15	20	25	45
0	14,4	90	50	10				
1	15,4	70	90	40	15			
3	15,8	10	55	90	55	20		
4	16,8		20	75	90	30	10	
5	20			55	> 100	90	30	
7	23,5			10	40	83	90	

5 A2

Doble deflexión $2\alpha_T$ (°)	Ganancia (dB)	Amplitud del eco sobre la entalladura según la oblicuidad (%)						
		0	5	10	15	20	25	45
0	11	90	53	10				
3	12	20	90	20				
6	15,5		20	90	10	20		
8	20,5	25	20	35	90	10		
11	32,2	80	50	35	50	90		
16	40	> 100	> 100	90	65	65	70	

REIVINDICACIONES

1. Instalación de inspección no destructiva para productos metalúrgicos, en particular con acoplamiento indirecto, que comprende:

- 5 - un dispositivo sensor de ultrasonidos (3) que comprende un conjunto de elementos transductores ultrasónicos (Ci), accesibles selectivamente,
- un circuito de aguas arriba (1), adecuado para excitar selectivamente los elementos transductores en instantes elegidos,
- un circuito de aguas abajo (2, 4), adecuado para recoger las señales captadas de vuelta por los elementos transductores, y
- 10 - un componente de procesamiento (5) adecuado para analizar las señales captadas, en calidad de respuesta global (7) de un producto metalúrgico a una excitación ultrasónica,

caracterizada porque el circuito de aguas arriba (1) está establecido para operar por disparos, asociados a una misma ley temporal de excitación de los elementos transductores,

15 **porque** el circuito de aguas abajo (2, 4) comprende una memoria (4) y está establecido para guardar unas muestras de las señales captadas (Sij) por cada elemento transductor, en correspondencia con cada disparo, en una profundidad temporal elegida,

porque el componente de procesamiento es apto para cooperar con esa memoria con el fin de:

- 20 - para cada disparo, leer y sumar (5) repetitivamente unos grupos de muestras (Sij) correspondientes a diferentes elementos transductores (Ci), así como a instantes (tj) desplazados de un elemento a otro, y ello según una ley temporal elegida de procesamiento, adecuada para cada repetición, lo cual permite calcular para cada disparo una pluralidad de respuestas reconstituidas (S_T, α_T) de las cuales cada una correspondería a una deflexión α_T en emisión, y
- analizar la respuesta global constituida por el conjunto de estas respuestas reconstituidas, y

25 **porque** los elementos transductores ultrasónicos (Ci) son de divergencia (δ) al menos igual al ángulo máximo de deflexión, para las diferentes respuestas reconstruidas.

2. Instalación según la reivindicación 1, **caracterizada porque** el circuito de aguas abajo comprende un bloque de digitalización (2) de las señales captadas por cada uno de los elementos (Ci) del dispositivo sensor (3).

30 3. Instalación según la reivindicación 2, **caracterizada porque** la memoria (4) está establecida para cooperar con el bloque de digitalización (2) a efectos de almacenar, en función, por una parte, de instantes sucesivos y, por otra parte, de elementos transductores activos, las muestras de las señales (Sij) captadas por cada elementos transductor.

35 4. Instalación según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizada porque** el componente de procesamiento incorpora unos medios de cálculo (5) capaces de definir los repartos de los retardos que respectivamente han de aplicarse a las señales captadas, para obtener, para cada reparto, una respuesta reconstituida que correspondería a un disparo según una deflexión de haz elegida (α_T).

5. Instalación según una de las reivindicaciones 3 y 4, **caracterizada porque** el componente de procesamiento incorpora unos medios de selección que le permiten acceder a la memoria en función de los tiempos asociados a las muestras, para cada elemento transductor.

40 6. Instalación según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada porque** el circuito de aguas arriba (1) está dotado de una ley temporal de excitación que corresponde a una excitación de los elementos transductores (Ci), sensiblemente sin desfase entre ellos.

45 7. Instalación según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada porque** el circuito de aguas arriba (1) está dotado de una ley temporal de excitación que corresponde a una excitación de los elementos transductores (Ci), con, entre ellos, unos desfases que definen un haz deflectado en emisión, y **porque**, en presencia de esta ley temporal de excitación, el componente de procesamiento (5) está establecido para definir unos repartos de retardos que han de aplicarse a las señales captadas, teniendo en cuenta los desfases entre elementos transductores en la excitación, de modo que las respuestas reconstituidas corresponden cada una de ellas a una deflexión α_T centrada alrededor del ángulo de deflexión física del haz en emisión.

8. Instalación según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada porque** cada grupo de muestras

(Sij) sumadas corresponde a un subconjunto elegido de elementos transductores, llamado sensor virtual.

9. Instalación según la reivindicación 8, **caracterizada porque** el componente de procesamiento (5) está establecido para calcular varias respuestas reconstituidas elementales del producto al mismo disparo bajo la misma deflexión α_T , para diferentes subconjuntos del dispositivo sensor.
- 5 10. Instalación según la reivindicación 9, **caracterizada porque** el componente de procesamiento (5) está establecido para calcular la respuesta reconstituida en forma de una función de las respuestas reconstituidas elementales para una misma deflexión α_T y para diferentes subconjuntos del dispositivo sensor.
11. Instalación según la reivindicación 10, **caracterizada porque** la respuesta reconstituida del producto al disparo bajo una deflexión α_T es la respuesta elemental que presenta una amplitud máxima de pico.
- 10 12. Instalación según una de las reivindicaciones 8 a 11, **caracterizada porque** el componente de procesamiento (5) está establecido para calcular las respuestas reconstituidas para diferentes deflexiones α_T , con diferentes subconjuntos del dispositivo sensor.
13. Instalación según una de las reivindicaciones 8 a 12, **caracterizada porque** los diferentes subconjuntos del dispositivo sensor, para calcular una respuesta reconstituida del producto al disparo bajo una deflexión α_T , incorporan sensiblemente un mismo número (N_v) de elementos transductores.
- 15 14. Instalación según la reivindicación 13, **caracterizada porque** los subconjuntos del dispositivo sensor se escogen del mismo excluyendo en cada extremo una banda de guarda cuyo número de elementos transductores es cercano a la mitad ($N_v / 2$) del número de elementos transductores de un subconjunto.
15. Instalación según una de las reivindicaciones 13 y 14, **caracterizada porque** dos subconjuntos consecutivos se deducen uno del otro mediante una traslación de un paso π , llamado paso de imbricación.
- 20 16. Instalación según la reivindicación 15, **caracterizada porque** dos subconjuntos consecutivos comprenden elementos comunes.
17. Instalación según una de las reivindicaciones 8 a 16, **caracterizada porque** el número elegido de subconjuntos del dispositivo sensor para calcular una respuesta reconstituida bajo una deflexión α_T corresponde sensiblemente al número máximo de posibles subconjuntos para el paso de imbricación π elegido y para el número N_v de elementos elegidos de entre ($N_T - N_v$) elementos.
- 25 18. Instalación según una de las reivindicaciones precedentes, destinada a la inspección de productos metalúrgicos del tipo tubos de acero (T), **caracterizada porque** incorpora unos medios de arrastre de los tubos según un movimiento helicoidal alrededor del eje de los tubos y **porque** el dispositivo sensor de ultrasonidos está realizado en forma de una barra lineal (3) de elementos transductores, dispuesta sensiblemente paralela al eje del tubo (T) y establecida para que el haz ultrasónico en emisión posea una deflexión elegida (α_L) en un plano de sección transversal del tubo (T), lo cual permite detectar en particular los defectos oblicuos.
- 30 19. Instalación según una de las reivindicaciones 1 a 17, destinada a la inspección de productos metalúrgicos del tipo tubos de acero, **caracterizada porque** incorpora unos medios de arrastre de los tubos (T) según un movimiento rectilíneo a lo largo de su eje y **porque** el dispositivo sensor de ultrasonidos está realizado en forma de una barra lineal (3) de elementos transductores, dispuesta sensiblemente paralela al eje del tubo (T) y establecida para que el haz ultrasónico en emisión posea una deflexión elegida (α_L) en un plano de sección transversal del tubo (T), siendo la barra puesta en rotación alrededor del tubo, lo cual permite detectar en particular los defectos oblicuos.
- 35 20. Instalación según una de las reivindicaciones 1 a 17, destinada a la inspección de productos metalúrgicos del tipo tubos de acero, **caracterizada porque** incorpora unos medios de arrastre de los tubos (T) según un movimiento rectilíneo a lo largo de su eje y **porque** el dispositivo sensor de ultrasonidos está realizado en forma de una barra (3) de elementos transductores, sensiblemente en arco de círculo, dispuesta alrededor de un tubo (T), lo cual permite detectar en particular los defectos longitudinales.
- 40 21. Instalación según una de las reivindicaciones 1 a 17, **caracterizada porque** incorpora unos medios de arrastre de los tubos (T) según un movimiento rectilíneo a lo largo de su eje y **porque** el dispositivo sensor de ultrasonidos comprende una red de elementos transductores (13) establecidos sensiblemente según una superficie cilíndrica coaxial a un tubo (T), en varias filas de elementos paralelas entre sí y al eje del tubo (T), y **porque** el circuito de aguas abajo y su componente de procesamiento son aptos para determinar unos repartos de retardos en las señales captadas de vuelta por los elementos de un subconjunto o del conjunto de la red, lo cual permite detectar en particular defectos oblicuos.
- 45 50 22. Instalación según una de las anteriores reivindicaciones, **caracterizada porque** el componente de procesamiento va incorporado al circuito de aguas abajo.

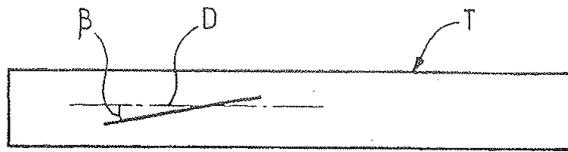


FIG. 1

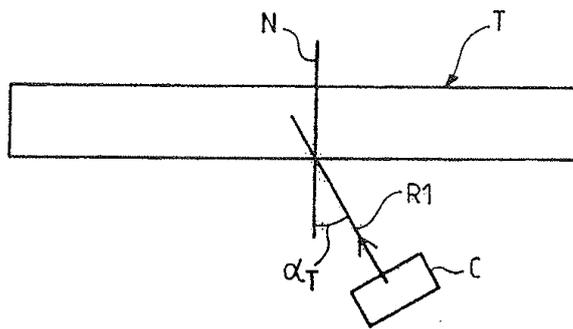


FIG. 2A

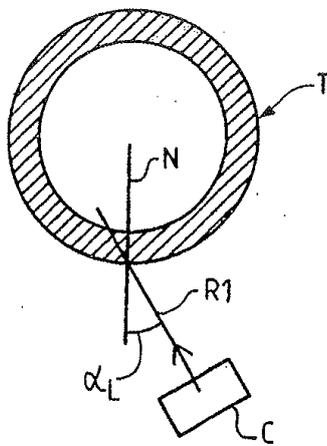


FIG. 2B

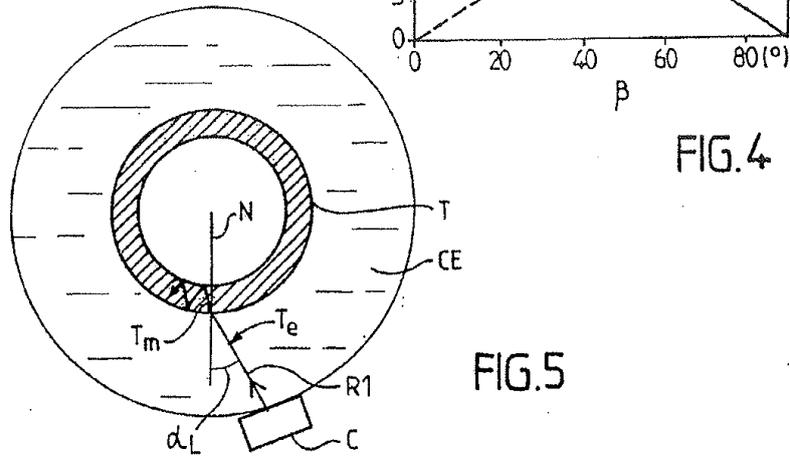
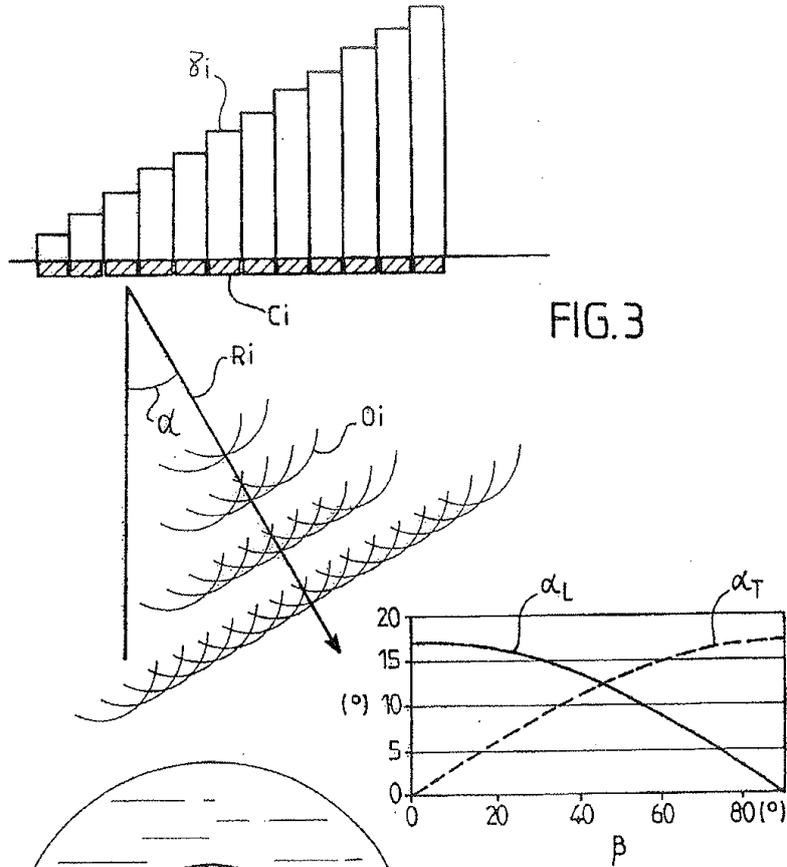


FIG. 5

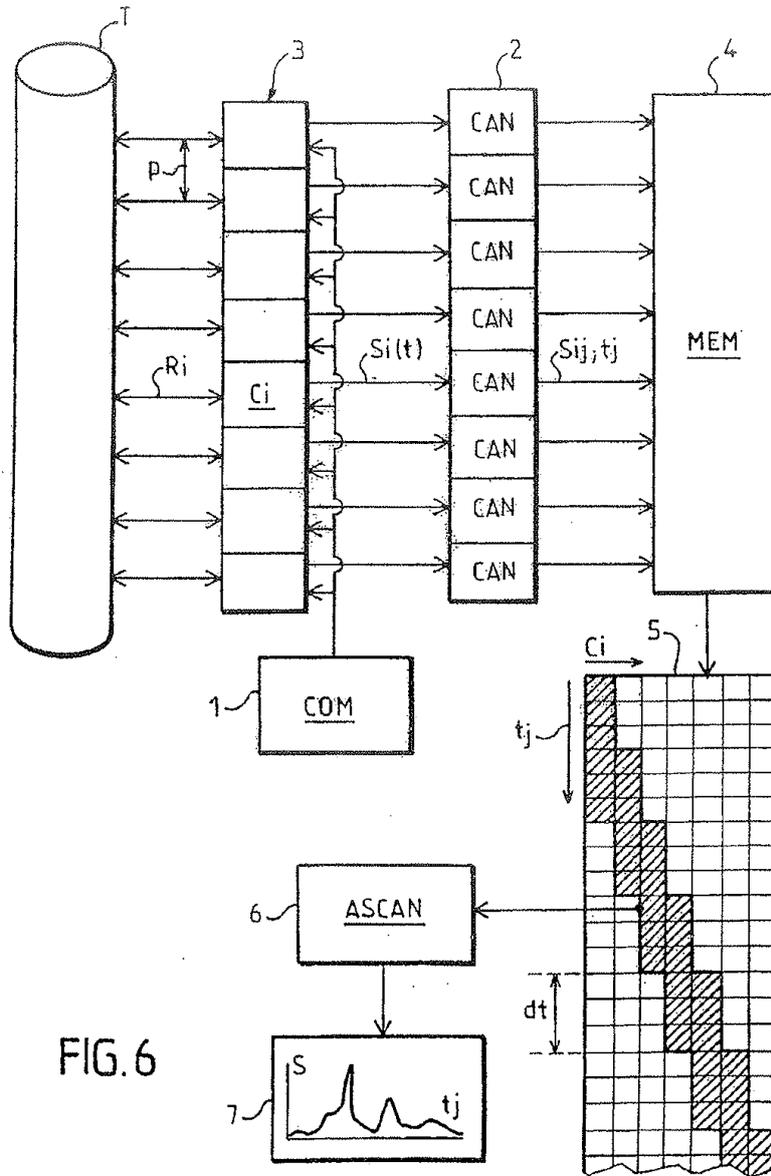


FIG. 6

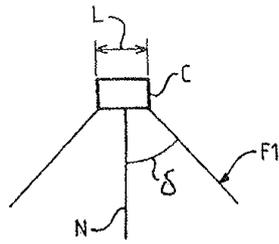


FIG. 7

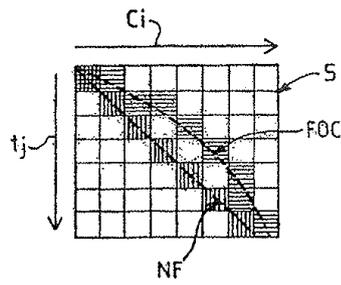


FIG. 8

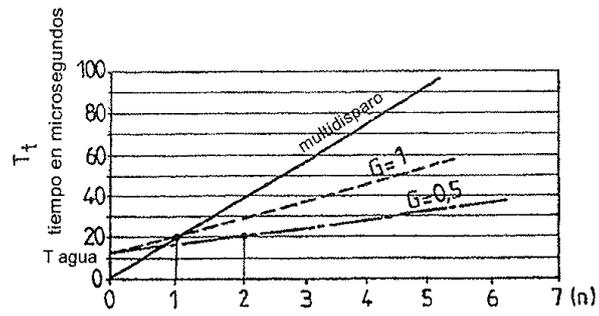


FIG. 9

$\beta=0^\circ$ $\beta=5^\circ$ $\beta=10^\circ$

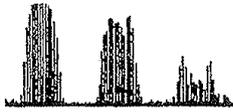


FIG.10

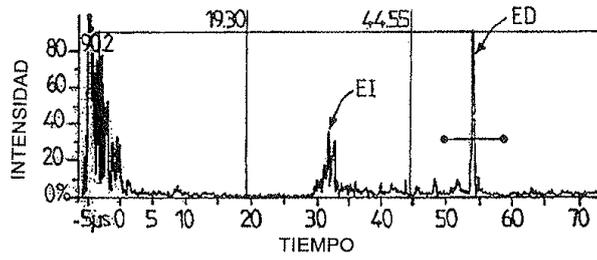


FIG.10A

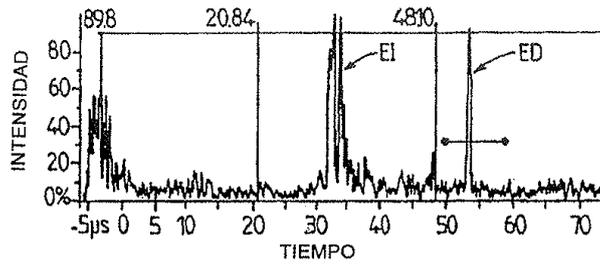


FIG.10B

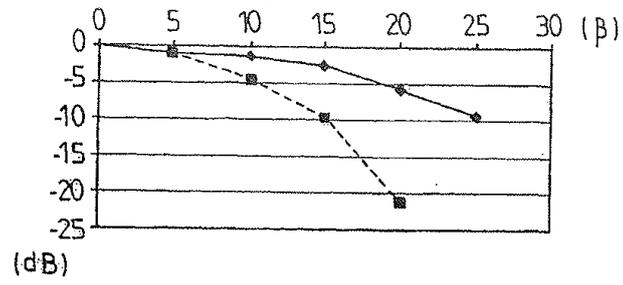


FIG.11

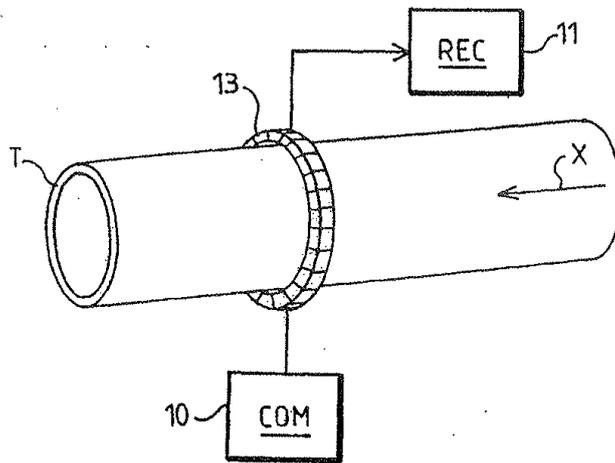


FIG.12

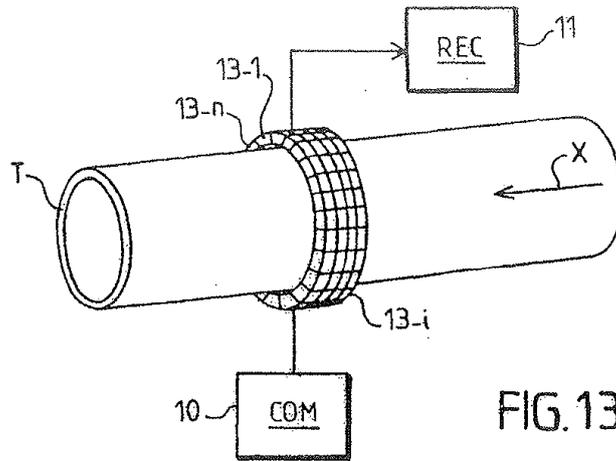


FIG.13

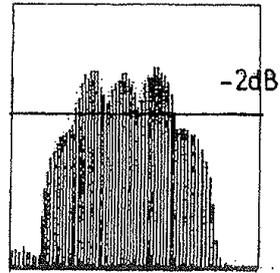


FIG.14

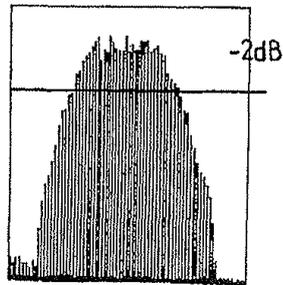


FIG.15

DOCUMENTOS INDICADOS EN LA DESCRIPCIÓN

En la lista de documentos indicados por el solicitante se ha recogido exclusivamente para información del lector, y no es parte constituyente del documento de patente europeo. Ha sido recopilada con el mayor cuidado; sin embargo, la EPA no asume ninguna responsabilidad por posibles errores u omisiones.

5 Documentos de patente indicados en la descripción

- FR 2796153 A [0008]
- US 3924453 A [0013] [0040]
- EP 0841580 A2 [0012]