

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 763 981**

51 Int. Cl.:

G01N 27/90 (2006.01)

F22B 37/00 (2006.01)

G21C 17/017 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.12.2013 PCT/EP2013/077341**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.06.2014 WO14096168**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.12.2013 E 13814898 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.11.2019 EP 2936135**

54 Título: **Procedimiento de evaluación del colmatado de un intercambiador térmico**

30 Prioridad:

19.12.2012 FR 1262330

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

01.06.2020

73 Titular/es:

**ELECTRICITÉ DE FRANCE (100.0%)
22-30 Avenue de Wagram
75008 Paris, FR**

72 Inventor/es:

PAUL, NICOLAS

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 763 981 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de evaluación del colmatado de un intercambiador térmico.

5 **Campo técnico y contexto de la invención**

La presente invención se refiere de una manera general al campo de la inspección de los tubos de un intercambiador de calor de tubos. Más precisamente, la invención se refiere a un procedimiento de evaluación del colmatado de pasos de una placa separadora de un intercambiador térmico de tubos, estando dichos pasos dispuestos a lo largo de los tubos y sirviendo para la circulación de un fluido en dicho intercambiador térmico a través de dicha placa.

Generalmente, un generador de vapor está compuesto por un haz de tubos por los que circula el fluido caliente, y alrededor de los cuales circula el fluido a calentar. Por ejemplo, en el caso de un generador de vapor de una central nuclear de tipo REP, los generadores de vapor son unos intercambiadores de calor que utilizan la energía del circuito primario procedente de la reacción nuclear para transformar el agua del circuito secundario en vapor que alimentará la turbina y para producir de este modo electricidad.

El generador de vapor conduce el fluido secundario de un estado de agua líquido al estado de vapor justo al límite de saturación, utilizando el calor del agua primaria. Esta circula por unos tubos alrededor de los cuales circula el agua secundaria. La salida del generador de vapor es el punto más alto en temperatura y presión del circuito secundario.

La superficie de intercambio, que separa físicamente los dos circuitos, está así constituida por un haz tubular, compuesto por 3500 a 5600 tubos, según el modelo, por los que circula el agua primaria llevada a alta temperatura (320°C) y alta presión (155 bar).

Estos tubos del generador de vapor son mantenidos por unas placas separadoras dispuestas de manera generalmente perpendicular a los tubos que las atraviesan.

Con el fin de dejar pasar el fluido que se evapora, los pasos de estas placas separadoras están foliculados, es decir que su forma presenta unos lóbulos alrededor de los tubos. Como el agua pasa del estado líquido al estado de vapor, ésta deposita todas las materias que contenía. Si los depósitos de materia se realizan en los lóbulos, estos disminuyen el paso libre: esto es el colmatado, que es por lo tanto la obturación progresiva, por depósitos, de los orificios destinados al paso de la mezcla agua/vapor.

La figura 1 ilustra esquemáticamente una vista por arriba de un paso foliculado en una placa separadora 10, por el que pasa un tubo 11. Los lóbulos 12a y 12b permiten que el agua atraviese la placa separadora 10 a lo largo del tubo 11, permitiendo así la circulación del agua en el generador de vapor. Un depósito 13 es visible a nivel del lóbulo 12b, colmatando dicho lóbulo 12b. El depósito puede situarse por el lado del tubo y/o por el lado de la placa.

El colmatado conduce a unas modificaciones del flujo del agua en el generador de vapor, y favorece de este modo la aparición de vibraciones excesivas de los tubos, así como inducirá unas fuerzas mecánicas importantes sobre las estructuras internas de los generadores de vapor. Esta degradación tiene, por lo tanto, unos efectos al mismo tiempo en la seguridad y en las prestaciones de las instalaciones. Por lo tanto, es indispensable conocer bien la naturaleza y la evolución de esta degradación.

Actualmente, el único sistema de examen no destructivo que sea capaz de acceder a la totalidad de las intersecciones tubos/placas separadoras de los generadores de vapor es la sonda axial de corriente de Foucault (sonda SAX). Este ejemplo de sistema de examen se describe en el informe de tesis de Karim Beddek titulado "Propagation d'incertitudes dans les modèles éléments finis en électromagnétisme - Application au contrôle non destructif par courants de Foucault" (2012). Las corrientes de Foucault aparecen en un material conductor cuando se hace variar el flujo magnético cercano. De este modo, se hace circular por un tubo de dicho intercambiador una sonda de corriente de Foucault multifrecuencia y se mide con ésta una señal de medición en función del entorno en el que se encuentra la sonda, de la cual se pueden extraer informaciones en cuanto a anomalías en el intercambiador térmico.

Una variación de la inducción magnética, típicamente mediante una bobina por la cual circula una corriente alterna, genera unas corrientes de Foucault, de la cual se detecta la variación inducida del campo magnético. Típicamente, se mide la diferencia de tensión generada por la variación de impedancia de la bobina.

El aprovechamiento de las señales de medición de esta sonda de corriente de Foucault no induce una prolongación de la detención del generador de vapor, ya que esta sonda de corriente de Foucault ya se utiliza cuando tienen lugar las detenciones parciales, en particular para inspeccionar la integridad de los tubos del generador de vapor.

Esta sonda de corriente de Foucault, destinada inicialmente a la detección de daños de los tubos, es también

sensible al colmatado. Además, la interpretación de esta señal se realiza actualmente de manera manual por operarios especializados, lo cual resulta muy largo, del orden de una semana de tratamiento aproximadamente para el análisis de un único generador de vapor. Además, la intervención de un operario para recoger mediciones a partir de un programa de análisis da lugar frecuentemente a un sesgo difícil de cuantificar.

5

Además, la señal de medición no está calibrada y es ruidosa, de manera que su aprovechamiento puede resultar difícil.

10

La evaluación del aspecto colmatado de un paso foliculado por un operario a partir de la señal de medición es, además, muy poco fiable, siendo efectuada generalmente de manera empírica a la vista de la señal recibida y de su comparación con otras señales que corresponden a otros pasos cuyo estado se conoce, por ejemplo por inspección televisual.

Presentación de la invención

15

Un objetivo general de la invención es paliar la totalidad o parte de los defectos de los métodos de evaluación del colmatado de los pasos foliculados alrededor de los tubos en las placas separadoras del estado de la técnica.

20

Se propone en particular un procedimiento de evaluación del colmatado de pasos de una placa separadora de un intercambiador térmico de tubos, estando dichos pasos dispuestos a lo largo de los tubos para el paso de la placa separadora, en el que se hace circular en un tubo de dicho intercambiador una sonda de corriente de Foucault, y se mide con ésta una señal de medición en función del entorno en el que se encuentra la sonda, y en el que, para evaluar el colmatado a nivel del borde aguas abajo de una placa separadora:

25

- se determina a partir de la señal de medición una señal de borde inferior que corresponde al paso del borde aguas abajo de la placa separadora por la sonda,

30

- se determina, a partir de la señal de medición, una señal de borde superior que corresponde al paso del borde aguas arriba de la placa separadora por la sonda,

35

- se determina una estimación de la respuesta impulsional de la sonda que corresponde al paso de la placa separadora por la sonda en el tubo y que es representativa de la respuesta de la sonda de corrientes de Foucault a una variación de impedancia;

40

- se realiza una deconvolución de la señal de borde inferior mediante dicha estimación de la respuesta impulsional que corresponde al paso de la placa separadora por la sonda en el tubo y que es representativa de la respuesta de la sonda de corrientes de Foucault a una variación de impedancia;

- se evalúa el colmatado del paso a nivel del borde aguas abajo de una placa separadora, analizando la señal de borde inferior así deconvolucionada mediante la estimación de la respuesta impulsional.

Este procedimiento se completa ventajosamente mediante las características siguientes, consideradas solas o según cualquiera de sus combinaciones técnicamente posibles:

45

- la sonda adquiere por lo menos en parte la señal de medición en modo diferencial;

50

- la señal de medición es una señal multifrecuencia compuesta por lo menos por dos señales a unas frecuencias diferentes, y la señal de borde inferior y la señal de borde superior resultan de combinaciones lineales de por lo menos dos señales a unas frecuencias diferentes de dicha señal de medición;

55

- la combinación lineal hace intervenir un coeficiente complejo optimizado para minimizar la potencia de señal a lo largo del tubo fuera de las zonas de presencia de placa;

- la respuesta impulsional de la sonda se estima a partir de la señal de borde superior;

60

- la deconvolución de la señal de borde inferior mediante la estimación de la respuesta impulsional de la sonda se realiza utilizando un filtro construido a partir de dicha estimación de respuesta impulsional;

- la respuesta en frecuencia del filtro es una aproximación de la inversa de la transformada de Fourier de la respuesta impulsional de la sonda;

- el filtro es un filtro de Wiener y la deconvolución es una deconvolución de Wiener;

65

- la respuesta en frecuencia del filtro de Wiener es de la forma:

$$G[f] = \frac{H^*[f]}{\|H[f]\|^2 + \frac{B[f]}{S[f]}}$$

designando el exponente * la conjugación compleja, $H[f]$ la transformada de Fourier de la respuesta impulsional de la sonda, $S[f]$ la densidad espectral de potencia de la señal a estimar y $B[f]$ la densidad espectral de potencia del ruido;

- la respuesta impulsional de la sonda $h[n]$ se estima a partir de la respuesta de la sonda $z_{sup}[n]$ al paso del borde aguas arriba de la placa separadora por la sonda según:

$$h[n] = -z_{sup}[-n]$$

- un filtrado por un filtro de paso bajo se aplica a la señal de borde inferior deconvolucionada, siendo la frecuencia de corte de dicho filtro de paso bajo determinada por medio de una desviación estándar de una función gaussiana que constituye una aproximación de la parte real de un impulso de la señal que corresponde al paso de un borde de placa separadora limpia por la sonda;
- el análisis de la señal de borde inferior deconvolucionada comprende el análisis de la parte real y de la parte imaginaria de dicha señal de borde inferior deconvolucionada;
- el análisis de la señal de borde inferior deconvolucionada comprende la definición de indicadores que corresponden a unos pares de extremos de magnitudes físicas de la parte imaginaria de la señal de borde inferior.

La invención se refiere asimismo a un producto programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código de programa para la realización de las etapas del procedimiento según la invención, cuando dicho programa es ejecutado en un ordenador.

Presentación de las figuras

Otras características, objetivos y ventajas de la invención se desprenderán de la descripción siguiente, puramente ilustrativa y no limitativa, y que debe ser leída con respecto a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1, ya comentada, ilustra esquemáticamente, en vista por arriba, un paso foliculado en una placa separadora, por el que pasa un tubo, según una configuración habitual de un generador de vapor;
- la figura 2 es un esquema de principio que ilustra el calibrado de la señal de medición;
- la figura 3 es un esquema de principio de la extracción de las partes de señal que corresponden al paso de las placas separadoras;
- la figura 4 es un esquema de principio del procedimiento de evaluación del colmatado;
- la figura 5 ilustra los cambios de impedancia recogidos por una sonda ideal en una configuración de paso no colmatado (placa denominada limpia);
- las figuras 6 y 7 ilustran el aspecto de las señales deconvolucionadas en la configuración de placa limpia;
- las figuras 8 y 9 ilustran los cambios de impedancia recogidos por una sonda ideal en una configuración de paso colmatado por un depósito de magnetita situado al mismo nivel que el borde inferior de la placa separadora;
- las figuras 10 y 11 ilustran el aspecto de las señales deconvolucionadas en la configuración de paso colmatado por un depósito de magnetita situado al mismo nivel que el borde inferior de la placa separadora;
- las figuras 12 y 13 ilustran los cambios de impedancia recogidos por una sonda ideal en una configuración en la que un anillo de depósito de magnetita está presente en el tubo a una altitud inferior a la altitud de la placa separadora;
- las figuras 14 y 15 ilustran el aspecto de las señales deconvolucionadas en la configuración en la que un anillo de depósito de magnetita está presente en el tubo a una altitud inferior a la altitud del borde inferior de la placa separadora;
- las figuras 16 y 17 ilustran los cambios de impedancia registrados por una sonda ideal en una configuración

en la que un tubo ensuciado por un depósito de magnetita presenta una ruptura de ensuciado por debajo del borde inferior de la placa separadora;

- 5 - las figuras 18 y 19 ilustran el aspecto de las señales deconvolucionadas en la configuración en la que un tubo ensuciado por un depósito de magnetita presenta una ruptura de ensuciado por debajo del borde inferior de la placa separadora;

Descripción detallada

10 Extracción de las partes útiles de la señal de medición

15 Con el fin de proceder a la evaluación del colmatado de los pasos foliculados 12a, 12b de las placas separadoras 10, la señal de medición sufre preferentemente un pretratamiento que tiene como objetivo en particular extraer de ésta las partes que corresponden al paso por la sonda de las placas separadoras. La extracción de estas partes útiles de la señal de medición se puede realizar de diferentes maneras. La solicitud de patente francesa nº 1256584 presenta un modo de realización preferido de determinación de la posición de las placas separadoras, cuyos principios se recuerdan a continuación.

20 Se hace circular en un tubo 11 de dicho intercambiador una sonda de corriente de Foucault multifrecuencia y se mide con ésta una señal de medición función del entorno en el que se encuentra la sonda. La señal de medición se obtiene por lo tanto por la sonda axial de corriente de Foucault durante su desplazamiento en el tubo 11 del generador de vapor. Esta señal de medición es multifrecuencia, y se presenta en forma compleja con unas componentes reales e imaginarias. En el marco de esta descripción, se considera una señal con unas componentes complejas según tres frecuencias procedentes de tres canales de adquisición, de los cuales dos en modo diferencial designados $z_1[n]$ y $z_3[n]$ y un modo absoluto designado $z_A[n]$. Las frecuencias están, por ejemplo, comprendidas en el intervalo 100-600 kHz.

25 Al efectuar la sonda una ida y vuelta en el tubo, se elegirán preferentemente las señales que corresponden a la fase de desplazamiento en la que la sonda es estirada por el mecanismo que la desplaza, típicamente durante su vuelta. En efecto, resulta de ello una mejor estabilidad mecánica de la sonda, y en consecuencia una velocidad más regular de ésta.

30 La selección de la parte de la señal de la sonda que corresponde a la vuelta de la sonda se basa en la detección de una caída importante de la tensión medida en el momento en el que la sonda bascula para recorrer el tubo en el sentido de vuelta. La selección de una señal de medición limitada a un solo sentido de la sonda permite también limitar la cantidad de datos a guardar y a tratar.

35 Teniendo en cuenta la sensibilidad de las adquisiciones de las señales de las corrientes de Foucault a las condiciones de adquisición, al basculamiento de la sonda y con el fin de estandarizar las señales analizadas, se realiza preferentemente una etapa previa de calibración.

40 Se trata de calibrar las señales con respecto a unas señales de referencia, denominadas señales de calibración. Estas últimas corresponden a unos defectos implantados sobre el tubo de calibración, y cuyas características (amplitud y fase) son conocidas. La calibración (etapa S0) se efectúa de la misma manera sea cual sea la frecuencia de adquisición considerada con, en referencia a la figura 2, para cada tubo controlado:

- 45 - identificación (etapa S20) de las partes de la señal de medición que corresponden a unos defectos conocidos del tubo del intercambiador térmico,
- 50 - estimación (etapa S21) de la fase y de la amplitud de las partes de la señal de medición que corresponden a los defectos conocidos,
- determinación (etapa S22) de una transformación a aplicar a la señal de medición a partir de dichas partes de la señal de medición que corresponden a los defectos conocidos para calibrar la señal de medición,
- 55 - aplicación (etapa S23) de la transformación a la señal de medición.

60 Siendo $z_{ruid}(f)=x+jy$ (en el que j es el número imaginario) procedente de una adquisición a la frecuencia f , y siendo $z_{calib}(f)=x_{calib}+jy_{calib}$ la impedancia compleja medida para un defecto de calibración dado a la misma frecuencia.

Un defecto de calibración se caracteriza por dos parámetros A_0 y θ_0 que son respectivamente la amplitud y la fase del vector máx-mín (vector de amplitud máxima en la representación según Lissajous). Son las características que debe presentar el defecto de calibración después de la calibración.

65 Antes de la calibración, estos dos parámetros valen respectivamente A y θ . La calibración de la señal z consiste entonces en una rotación de ángulo $\delta\phi = \theta_0 - \theta$ y una homotecia de parámetro $h=A_0/A$ tal como se describe mediante

la ecuación siguiente:

$$z = h z_0 e^{j\delta\phi}$$

5 De hecho, no se recurre a configuración geométrica del tubo o del intercambiador térmico para detectar la zona del defecto, sino únicamente a las características de la señal (fase y amplitud). Se dispone así de una calibración independiente de los problemas de manipulación de la sonda o de muestreo de la señal, susceptible de falsear la apreciación de la posición de la parte de la señal que corresponde al defecto.

10 Una vez calibrada la señal de medición, quedan por determinar las partes de la señal de medición multifrecuencia que corresponden al paso a nivel de las placas separadoras 10 de la sonda detectora de corrientes de Foucault que adquiere dicha señal de medición en el tubo del intercambiador térmico.

15 La señal de medición es muy ruidosa y no se puede utilizar directamente para detectar las placas separadoras 10. Con el fin de facilitar esta detección, se construye una señal de detección, designada $d[n]$, por combinación lineal de componentes de la señal de medición de frecuencias diferentes para minimizar la energía de la señal de detección entre las placas separadoras 10, tomando al mismo tiempo un valor importante al paso de las placas separadoras 10.

20 Las señales disponibles al comienzo del algoritmo son las tres señales complejas calibradas $z_A[n]$, $z_1[n]$ y $z_3[n]$ que corresponden al retorno de la sonda en el tubo. Sólo se utilizan en esta parte las señales que corresponden al modo diferencial (z_1 y z_3), más sensibles a los pasos de la sonda por una placa. Se designarán $x_i[n]$ e $y_i[n]$ las componentes respectivamente reales e imaginarias de la señal $z_i[n]$.

25 En un primer tiempo, el conjunto de las mediciones disponibles es filtrado por un filtro de paso alto para suprimir las bajas variaciones de las señales debidas al movimiento horizontal de la sonda en el tubo. Para cada señal disponible, se aplica un filtro de paso alto (por ejemplo un filtro de Butterworth), por ejemplo de frecuencia reducida de corte 0,01. Las señales que resultan del filtrado de las señales z_1 y z_3 se designan z_{1f} y z_{3f} . Las partes reales e imaginarias de estas señales se designan por lo tanto:

30

$$\begin{aligned} z_{1f}[n] &= x_{1f}[n] + j y_{1f}[n] \\ z_{3f}[n] &= x_{3f}[n] + j y_{3f}[n] \end{aligned}$$

35 Esta primera operación de filtrado permite construir unas señales que presentan una línea de base de media constante y nula. Para construir a continuación una señal de detección que sea la más baja posible entre las placas, se empieza por buscar una ventana de observación expresada en número de muestras de señal que limita el impacto del paso de una placa separadora 10.

40 Para ello, se dispone de información sobre la velocidad media v de la sonda, así como sobre la frecuencia de muestreo f_e . Conociendo la velocidad de la sonda y su frecuencia de muestreo, cada distancia puede ser convertida en un número de muestras de señal según la fórmula:

$$N_{muestras} = \frac{\text{distancia} \times f_e}{v}$$

45 Se puede buscar, por ejemplo, una ventana de observación que corresponde a una longitud de M muestras inferior al número de muestras entre dos placas separadoras 10 sucesivas $N_{pe,pe}$, por ejemplo

$$M = \frac{N_{pe,pe}}{2}$$

50 Esta búsqueda se efectúa por ejemplo sobre la señal x_{3f-x3f} que presenta una fuerte variancia cuando tiene lugar el paso de la sonda a nivel de una placa separadora 10. Basta, para encontrar dicha ventana, con buscar la porción de la señal de longitud M en la que la variancia de x_{3f} es mínima. Designando con m_0 el primer índice de ventana, se obtiene:

55

$$m_0 = \underset{m}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{n=m}^{m+M-1} \left(x_{3f}[n] - \frac{1}{M} \sum_{n=m}^{m+M-1} x_{3f}[n] \right)^2 \right\}$$

Sin embargo, las porciones de señal que corresponden al paso por las placas separadoras 10 no son conocidas, ya que es justamente lo que se busca determinar. Así, si se tuviese que encontrar una placa separadora 10 en la

ventana de observación, esto podría afectar mucho a la continuación del procedimiento.

Con el fin de limitar el impacto del paso de una placa separadora 10 en el cálculo, se selecciona preferentemente una ventana suficientemente grande. Por ejemplo, la ventana de observación puede corresponder a un número de muestras estimado de la señal de medición que representa la distancia entre unas placas separadoras 10 consecutivas a lo largo del tubo 11, es decir de tamaño $M=N_{pe,pe}$.

Para limitar el impacto del paso por una placa separadora 10, se puede también seleccionar el conjunto de los índices de la señal n tales que $[x_{3f}[n]]$ es inferior a un cierto umbral. Este umbral puede ser, por ejemplo, la desviación estándar de la señal x_{3f} .

Se combinan entonces diferentes componentes de la señal de medición para determinar una señal de detección, efectuándose así la combinación seleccionada para minimizar la energía de la señal de detección. La combinación de las diferentes componentes de la señal de medición es una combinación lineal adaptativa, estando los valores de los coeficientes de ponderación utilizados para esta combinación determinados, para una muestra de la señal de detección, por minimización de la variancia de la señal de detección sobre la ventana de observación de la señal de medición alrededor de esta muestra.

Preferentemente, las diferentes componentes de la señal de medición combinadas para determinar la señal de detección son unas componentes reales e imaginarias de la señal de medición. Asimismo, diferentes componentes de la señal de medición combinadas para determinar la señal de detección son unas componentes de frecuencias diferentes.

Se buscan así unos coeficientes de ponderación α , β y γ tales que

$$x_{3f}[n] \approx \alpha \cdot x_{1f}[n] + \beta \cdot y_{3f}[n] + \gamma \cdot y_{1f}[n]$$

con el fin de construir la señal de detección $d[n]$ definida por

$$d[n] = x_{3f}[n] - \alpha \cdot x_{1f}[n] - \beta \cdot y_{3f}[n] - \gamma \cdot y_{1f}[n]$$

Además, para gestionar la fuerte no estacionariedad de los componentes de la señal de medición, se actualizan los coeficientes α , β y γ para cada muestra de señal. Más precisamente, el triplete $\{\alpha[n], \beta[n], \gamma[n]\}$ seleccionado en un instante n es el que minimiza la potencia del error de reconstrucción en una ventana de señal centrada en la n -ésima muestra:

$$\{\alpha[n], \beta[n], \gamma[n]\} = \underset{\alpha, \beta, \gamma}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{k=n-M/2}^{k=n+M/2-1} (x_{3f}[k] - \alpha x_{1f}[k] - \beta y_{3f}[k] - \gamma y_{1f}[k])^2 \right\}$$

La optimización de $\{\alpha[n], \beta[n], \gamma[n]\}$ se efectúa con la ayuda del algoritmo de los menores cuadrados. Se señala que se puede cambiar el número de coeficientes.

Se obtiene así una señal de detección $d[n]$ seleccionada por combinación lineal adaptativa de componentes reales e imaginarias de la señal de medición.

Este tipo de construcción de la señal de detección presenta varias ventajas:

- una estimación automática del coeficiente óptimo de combinación de las frecuencias (es decir búsqueda del coeficiente que minimiza la energía de la señal fuera de la placa);
- la combinación se puede realizar en todas los componentes (partes reales e imaginarias) de las diferentes frecuencias;
- los coeficientes de combinación no son constantes a lo largo del tubo, sino que varían con el fin de adaptarse al tubo. Se gestionan así las variaciones del estado del tubo.

Una vez construida la señal de detección, queda detectar unos picos de la señal de detección susceptibles de corresponder al paso de placas separadoras 10, por comparación con un umbral de detección. En efecto, la señal de detección así creada contiene diferentes picos, que corresponden al paso de la sonda por las diferentes placas, y no solamente las placas separadoras 10, y otros elementos de estructuras.

Estos picos de señal pueden ser identificados conservando sólo los picos de señal superiores a un umbral de

detección s.

Preferentemente, el umbral de detección para detectar los picos de la señal de detección depende del valor mínimo que toma la desviación estándar σ de la señal de detección sobre una parte de la señal que corresponde a un número de muestras inferior al número de muestras estimado entre dos placas separadoras 10 consecutivas.

La desviación estándar σ se puede determinar de la manera siguiente:

$$\sigma = \min_m \left\{ \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{n=m}^{m+M-1} \left(d[n] - \frac{1}{M} \sum_{n=m}^{m+M-1} d[n] \right)^2} \right\}$$

El umbral de detección debe ser entonces un compromiso entre el riesgo de falsas detecciones (un umbral demasiado bajo provoca la detección de numerosos picos que no corresponden al paso de una placa separadora 10 por la sonda) y el riesgo de no detectar una placa separadora 10. Puede estar comprendido, por ejemplo, entre 5 y 15 σ , preferentemente 10 σ .

Puede que el paso de la sonda por una placa separadora se traduzca por varios pasos de la señal por encima del umbral de detección. Para guardar sólo un pico por placa, para localizar a continuación los picos que corresponden a las placas separadoras 10, se efectúa el ensayo siguiente sobre los pares de picos sucesivos: si $n1$ y $n2$ son dos índices de picos sucesivos, se dirá que $n2$ es un "pico secundario" de $n1$ si $d[n1] > d[n2]$ y si el número de muestras entre $n1$ y $n2$ es muy inferior a la distancia mínima estimada entre dos picos de placas.

Así, previamente a la etapa de selección de los picos, se restringen los picos detectados a los picos que corresponde a un máximo local de la señal de detección sobre un intervalo de la señal de detección que corresponde a un número de muestras a uno y otro lado del máximo local inferior o igual al mínimo de los tres valores siguientes:

- 0,5 veces un número de muestras estimado entre dos placas separadoras
- 0,8 veces un número de muestras estimado entre la placa separadora de la rama caliente más próxima de la rama fría de dicho intercambiador térmico y la placa separadora de la rama fría más próxima de la rama caliente de dicho intercambiador térmico,
- 0,8 veces un número de muestras estimado entre una primera de las placas separadoras y otra placa anterior en el sentido de circulación de la sonda.

Al suprimirse los picos secundarios, queda entonces por seleccionar unos picos de la señal de detección que corresponden al paso de las placas separadoras 10 por una determinación de los picos de la señal que presentan un espaciado regular.

Idealmente, si la sonda tiene una velocidad conocida y constante v , entonces el número de muestras entre dos placas es exactamente proporcional a la distancia entre placas:

$$N_{pe,pe} = \frac{\text{distancia entre placas} \times f_e}{v}$$

En este caso ideal, bastaría para identificar los índices de las muestras correspondientes guardar sólo los picos cuyos índices están exactamente espaciados en $N_{pe,pe}$. En la práctica, la velocidad de la sonda no es exactamente constante ni precisamente conocida y puede variar a lo largo del tubo. La desviación entre dos picos que corresponden a unas placas separadoras 10 no es por lo tanto exactamente igual a $N_{pe,pe}$ y puede ser diferente de un par de placas separadoras 10 a otra. Esta desviación estándar entre placas separadoras 10 puede no obstante ser estimada.

Para ello, se seleccionan los picos de la señal de detección que corresponden al paso de las placas separadoras 10 por la selección de por lo menos un sub-conjunto de picos que minimizan la diferencia entre el número de muestras de la señal de detección entre dos picos sucesivos de dichos sub-conjuntos y un valor mediano del número de muestras de las señales de detección entre dos picos sucesivos.

Un tubo de un intercambiador térmico se extiende a lo largo de éste a través de dos partes, denominadas generalmente rama fría y rama caliente, en función del sentido de flujo de los fluidos que realizan el intercambio térmico, separadas por una estructura sin placa separadora 10 designada como la percha. En consecuencia, este tipo de estructura rompe la regularidad de la separación de las placas separadoras. Es suficiente con requerir el

procedimiento siguiente para una rama, y después para la otra, para seleccionar el conjunto de los picos que corresponden a las placas separadoras 10.

Se denomina i_k el índice del k-ésimo pico detectado, $\Delta[k]=i_{k+1}-i_k$ la desviación entre los picos sucesivos k y k+1, y $N_{pe,pe,real}$ el número de muestras medio entre dos placas separadoras 10. Al ser las placas separadoras las placas mayoritarias a lo largo del tubo, la mayoría de los valores tomados por $\Delta [k]$ está situada alrededor de $N_{pe,pe,real}$. Por lo tanto una estimación de $N_{pe,pe,real}$ está proporcionada por el valor medio del conjunto de los valores tomados por $\Delta [k]$:

$$N_{pe,pe,real} = \text{mediana } \{\Delta[k]\}$$

Queda entonces por encontrar, de entre el conjunto I de los índices de picos, el sub-conjunto I_{pico} de índices que corresponden a los números de placas separadoras NbPe, tales que las desviaciones entre dos índices sucesivos sean siempre más o menos iguales a $N_{pe,pe,real}$:

$$I_{pico} = \underset{I}{\operatorname{argmin}} \sum_{i \in I} (\Delta[i] - N_{pe,pe,real})^2.$$

Se obtienen entonces los índices de las muestras de la señal que corresponde al paso de las placas separadoras 10.

Una vez estimado el conjunto de índices que corresponden al paso de la sonda por las placas separadoras 10, se puede proceder a continuación a una etapa subsiguiente de verificación, en la que las posiciones de los picos de la señal de detección que corresponden al paso de las placas separadoras 10 se comparan con unos datos conocidos sobre la geometría del intercambiador térmico. Se utilizan dos criterios: la longitud de las placas separadoras 10 y la longitud de la percha.

El primer criterio de verificación se refiere a la longitud de la percha: para cada tubo, el número de muestra entre la última placa de la rama caliente y la última placa de la rama fría se compara con la distancia conocida según los planos. Se permite un margen, para tener en cuenta la incertitud sobre la velocidad de la sonda.

El segundo criterio de validación permite verificar la longitud del conjunto de las placas detectadas. El algoritmo de detección que ha permitido estimar los índices de las placas separadoras 10 utiliza los picos positivos de la señal de detección. Sin embargo, el paso de la sonda por una placa separadora 10 genera sobre la señal por lo menos un pico positivo y un pico negativo (los dos picos corresponden a los pasos de la sonda por los bordes de placas).

Una nueva estimación de los índices de las placas separadoras 10 se puede obtener por lo tanto detectando esta vez los picos negativos de la señal de detección, sin tener en cuenta los primeros picos detectados. En la práctica, basta con recordar el algoritmo de detección de los picos tomando la opuesta a la señal de detección ($d[n]$ se vuelve $-d[n]$). El procedimiento puede así comprender una etapa final de verificación en la que se toma la opuesta a la señal de detección, se aplican las etapas de detección S2 y de selección S3 de las posiciones de los picos de la señal de detección que corresponden al paso de las placas separadoras 10 y se verifica que las desviaciones entre las posiciones de los picos y la señal de detección y su opuesta corresponden a la distancia borde con borde de una placa separadora 10.

Se dispone por lo tanto después, para cada rama, de dos conjuntos de índices estimados. Si estos dos conjuntos de índices son correctos, la desviación entre las dos estimaciones de una misma placa separadora 10 debe ser del orden de la magnitud del tamaño de una placa separadora 10. Teniendo en cuenta las imprecisiones sobre la velocidad de la sonda y los efectos de bordes de placas, se permite un margen para validar la estimación.

Como las posiciones de las placas separadoras en la señal de medición son conocidas, se puede extraer por lo tanto de ésta las partes útiles relativas a los pasos de las placas separadoras por la sonda.

Evaluación del colmatado

La señal útil relativa al paso de las placas separadoras 10 está por lo tanto disponible después de su extracción del conjunto de la señal de medición emitida por la sonda SAX. Para ello, se pueden considerar otros métodos distintos del presentado anteriormente. En esta fase, para cada placa espaciadora 10, se ha extraído por lo tanto a partir de la señal de medición una señal que corresponde al paso del borde aguas abajo de la placa separadora 10 por la sonda, y una señal que corresponde al paso del borde aguas arriba de la placa separadora 10 por la sonda.

Se procede entonces a la determinación a partir de la señal de medición de una señal de borde inferior que corresponde al paso del borde aguas abajo de la placa separadora 10 por la sonda, y de una señal de borde superior que corresponde al paso del borde aguas arriba de la placa separadora 10 por la sonda.

Así como se ha explicado anteriormente, la sonda adquiere por lo menos en parte la señal de medición en modo diferencial, y la señal de medición es una señal multifrecuencia compuesta por lo menos por dos señales de frecuencias diferentes.

Preferentemente, sólo se utilizan las señales que corresponden al modo diferencial (z_1 y z_3), ya que son más sensibles al paso de la placa separadora 10. Estas señales son adquiridas a unas frecuencias diferentes, y la señal de borde inferior se determina como combinación lineal de por lo menos dos señales a unas frecuencias diferentes de dicha señal de medición, en este caso z_1 y z_3 .

Esta combinación lineal hace intervenir un coeficiente complejo α optimizado para minimizar la potencia de señal a lo largo del tubo 11 fuera de las zonas de placa separadora 10.

Así, la señal de borde inferior z_{inf} se determina a partir de las señales obtenidas en modo diferencial sobre las frecuencias f_3 y f_1 , de manera que

$$z_{inf}[n] = z_{3inf}[n] - \alpha \cdot z_{1inf}[n],$$

con

$$\alpha = \operatorname{argmin} \|z_3[n] - \alpha \times z_1[n]\|^2,$$

para los índices n que corresponden a la señal fuera de las zonas de placa separadora 10, y correspondiendo z_{inf} a la respuesta de la sonda en modo diferencial sobre la frecuencia f_3 cuando tiene lugar el paso del borde aguas abajo, es decir inferior, de la placa separadora 10 por la sonda, y z_{inf} que corresponde a la respuesta de la sonda en modo diferencial sobre la frecuencia f_1 cuando tiene lugar el paso del borde aguas abajo, es decir inferior de la placa separadora 10 por la sonda.

Se procede de la misma manera con la señal de borde superior, con preferentemente el mismo coeficiente α , de manera que $z_{sup}[n] = z_{3sup}[n] - \alpha \cdot z_{1sup}[n]$, con z_{3sup} que corresponde a la respuesta de la sonda en modo diferencial sobre la frecuencia f_3 cuando tiene lugar el paso del borde aguas arriba, es decir superior, de la placa separadora 10 por la sonda, y z_{1sup} que corresponde a la respuesta de la sonda en modo diferencial sobre la frecuencia f_1 cuando tiene lugar el paso del borde aguas arriba, es decir superior, de la placa separadora 10 por la sonda.

Se obtienen así dos señales complejas. La señal de borde inferior z_{inf} se escribe:

$$z_{inf}[n] = x_{inf}[n] + i \cdot y_{inf}[n]$$

con x_{inf} e y_{inf} las componentes respectivamente real e imaginaria de la señal de borde inferior e i la unidad imaginaria tal que $i^2 = -1$. Asimismo, la señal de borde superior z_{sup} se escribe:

$$z_{sup}[n] = x_{sup}[n] + i \cdot y_{sup}[n]$$

con x_{sup} e y_{sup} las componentes respectivamente real e imaginaria de la señal de borde superior y i la unidad imaginaria tal que $i^2 = -1$.

Por lo tanto, queda realizar un tratamiento adecuado de estas señales con el fin de evaluar el colmatado del paso de la placa separadora 10. Este tratamiento se realiza sobre la señal de borde inferior, que es una señal compleja. En efecto, el colmatado de los pasos foliculados, es decir los lóbulos 12a, 12b, en las placas separadoras 10 interviene a nivel del borde inferior de las placas separadoras 10, aguas arriba del paso para el flujo de fluido que atraviesa la placa separadora 10. Es por lo tanto a partir de la señal de borde inferior que se puede estimar el porcentaje de colmatado.

Más precisamente, la señal de borde inferior está deconvolucionada por la respuesta impulsional compleja de la sonda.

De hecho, en un caso ideal de una sonda SAX perfecta, la señal debería contener sólo una continuación de impulsos complejos, que corresponde al paso por un borde de placa separadora 10, al encuentro de un depósito, y el estudio de la única señal de borde inferior debería ser suficiente para cuantificar el colmatado.

Sin embargo, en la práctica, la respuesta de la sonda SAX a una variación de impedancia no es perfecta. Se la denomina la respuesta impulsional de la sonda. Por lo tanto, es necesario restaurar la señal de borde inferior para encontrar la respuesta de la sonda representativa del estado del colmatado del paso foliculado en la placa separadora 10. Se determina con este fin una estimación de la respuesta impulsional de la sonda, que corresponde preferentemente al paso de un borde limpio de la placa separadora 10 por la sonda en el tubo 11, por ejemplo a

partir de la señal de borde superior. Se busca entonces deconvolucionar la señal de borde inferior $z_{inf}[n]$ por una señal $h[n]$ que corresponde a la respuesta impulsional de la sonda al paso de la placa separadora.

5 Para ello, se puede utilizar un filtro. Este tipo de filtro se denomina filtro de deconvolución o también filtro de restauración. El filtro de deconvolución se calcula a partir de la estimación de la respuesta impulsional, y se realiza una deconvolución de la señal de borde inferior mediante dicho filtro de deconvolución (etapa S30). El filtro de deconvolución puede ser una aproximación a la inversa de la respuesta impulsional de la sonda. Puede ser también un filtro de Wiener y la deconvolución ser así una deconvolución de Wiener, lo cual constituye un modo de realización preferido del procedimiento descrito. Existen y se pueden utilizar otros métodos de deconvolución.

10 Por ejemplo, se puede buscar la señal de borde inferior deconvolucionada $z_{inf,id}[n]$ que mejor corresponde a la señal de borde inferior $z_{inf}[n]$ que se ha observado:

$$z_{inf,id}[n] = \underset{z[n]}{\operatorname{argmin}} \{ J_1(z_{inf}[n] - z[n] \otimes h[n]) + \lambda \times J_2(z[n]) \}$$

15 con J_1 el criterio de adecuación a los datos (por ejemplo una norma L_2 , una norma L_2 al cuadrado, una norma L_1 , etc.) y J_2 un criterio que traduce una característica conocida *a priori* sobre la señal que se desea reconstruir (por ejemplo una norma L_2 , una norma L_2 al cuadrado, una norma L_1 , una función de las desviaciones entre muestras próximas $z[n]-z[n-1]$). El término λ permite acordar más o menos importancia *a priori* sobre la solución (J_2) con respecto a la adecuación a los datos (J_1). Este criterio también puede escribirse en el dominio frecuencial.

20 Existen por lo tanto varias variantes de criterios de deconvolución J_1 y J_2 que se pueden utilizar y, para cada variante, varios métodos de resoluciones, por ejemplo por filtrado o por unos métodos de optimización.

25 En el caso en el que el filtro de deconvolución es un filtro de Wiener, la respuesta en frecuencia del filtro de Wiener es de la forma:

$$G[f] = \frac{H^*[f]}{\|H[f]\|^2 + \frac{B[f]}{S[f]}}$$

30 con el exponente * que designa la conjugación compleja, $H[f]$ la transformada de Fourier de la respuesta impulsional de la sonda, $S[f]$ la densidad espectral de potencia de la señal a estimar y $B[f]$ la densidad espectral de potencia del ruido. Un relleno de ceros o *zero-padding*, es decir una adición de ceros dentro de las señales, se puede efectuar cuando tiene lugar el cálculo de las transformadas de Fourier discretas con el fin de aumentar la resolución frecuencial.

35 La respuesta impulsional $h[n]$ de la sonda se puede estimar a partir de la respuesta de la sonda al paso del borde aguas arriba de la placa separadora 10 por la sonda, es decir mediante la señal de borde superior, según la fórmula:

$$h[n] = -z_{sup}[-n].$$

40 Por ejemplo, a partir de los tratamientos efectuados para extraer las partes útiles de la señal de medición, se conocen los índices i_{inf} e i_{sup} de la señal de medición que corresponden respectivamente a los pasos de los bordes inferior y superior de la placa separadora 10. Para una frecuencia de muestreo $F_e = 1000$ Hz, una velocidad de la sonda $v=0,5$ m.s⁻¹ y una longitud de placa separadora 10 de 30 mm, se tienen 60 muestras de señal que corresponden a la placa separadora 10, y una respuesta impulsional de 20 muestras aproximadamente. Se puede seleccionar entonces para el intervalo de valores de la señal de borde superior $z_{sup}[n]$ las 60 muestras según el centro de la placa separadora 10 determinado a aproximadamente $0,5x(i_{inf} + i_{sup})$, es decir un margen de 20 muestras a cada lado de la respuesta impulsional. Estas cifras se indican por supuesto a modo de ejemplo no limitativo de la utilización de la señal de borde superior $z_{sup}[n]$ para la estimación de la respuesta impulsional de la sonda.

55 Son posibles varios enfoques para estimar la relación entre ruido y señal que corresponde a la proporción de la densidad espectral de potencia del ruido $B[f]$ y de la densidad espectral de potencia $S[f]$ de la señal a estimar. Uno de estos enfoques consiste en aproximar esta relación mediante una constante. En efecto, la señal a estimar corresponde a una señal de borde inferior ideal que presentaría una sucesión de impulsos que corresponden a las variaciones de impedancia compleja encontradas por la sonda cerca del borde inferior de la placa separadora 10. Por consiguiente, se puede considerar la densidad espectral de potencia $S[f]$ de esta señal como una constante. La densidad espectral de potencia del ruido $B[f]$ se puede determinar sobre las porciones de la señal entre las placas separadoras 10. Esta se puede parecer a un ruido blanco, y por lo tanto esta densidad espectral de potencia de ruido $B[f]$ puede ser considerada como una constante. Así, la relación de las densidades espectrales de potencia

del ruido y de la señal a estimar se puede considerar como una constante. Esta constante se puede ajustar empíricamente, tomando por ejemplo:

$$\frac{B[f]}{S[f]} = 10 \times \sigma^2,$$

5

con σ^2 la potencia del ruido, calculada sobre una zona fuera de placas.

Una vez determinado el filtro de deconvolución, se puede proceder entonces a la deconvolución de la señal de borde inferior mediante dicho filtro de deconvolución. Se aplica entonces el filtro de deconvolución g a la señal de borde inferior Z_{inf} para obtener una señal de borde inferior deconvolucionada compleja $Z_{inf id}$ introducida por la respuesta impulsional de la sonda:

10

$$Z_{inf id} = Z_{inf} * g.$$

15

En la práctica, esta operación se puede realizar en el dominio frecuencial:

$$Z_{inf id} = \text{TF}^{-1}\{Z_{inf}[f] \times G[f]\},$$

20

con $Z_{inf}[f]$ la transformada de Fourier de la señal de borde inferior Z_{inf} , $G[f]$ la transformada de Fourier del filtro de deconvolución g , y TF^{-1} que indica la transformación de Fourier inversa.

25

Con el fin de evitar amplificar de manera demasiado sustancial algunas frecuencias que corresponden solo a un ruido de medición, se aplica un filtrado (etapa S31) por un filtro de paso bajo a la señal de borde inferior deconvolucionada, siendo la frecuencia de corte de dicho filtro de paso bajo determinada mediante una desviación estándar de una función gaussiana que constituye una aproximación de la parte real de un impulso de la señal de borde inferior que corresponde al paso de borde de placa separadora 10.

30

En efecto, la parte real o imaginaria de un impulso de la señal de borde inferior que corresponde al paso de borde de placa separadora 10 presenta unas formas muy parecidas a funciones gaussianas o a sus derivados. Por ejemplo, se puede parecer a una función gaussiana el impulso 0 en la parte real de la señal de borde inferior que corresponde al paso del borde inferior de la placa separadora 10 en una configuración sin colmatado, y a una combinación lineal de derivados de la función gaussiana los impulsos en la parte imaginaria de la señal de borde inferior que corresponde al paso de borde inferior de la placa separadora 10 en una configuración colmatada.

35

Si σ es la desviación estándar de esta función gaussiana, generalmente del orden de 3 a 4 muestras, las transformadas de Fourier de las señales a deconvolucionar ya no contienen energía más allá de una frecuencia máxima f_{max} :

$$f_{max} = \frac{3}{2\pi\sigma}.$$

40

Se puede seleccionar por lo tanto esta frecuencia máxima f_{max} como frecuencia de corte del filtro de paso bajo.

45

Una vez filtrada así la señal de borde inferior deconvolucionada, queda por analizar ésta para evaluar el colmatado. Este análisis se basa preferentemente en el análisis del aspecto de la parte real y de la parte imaginaria de la señal de borde inferior. Estos aspectos son comparados a los aspectos ideales esperados para varias configuraciones con el fin de identificar la configuración a la cual corresponde la señal de borde inferior deconvolucionada. Se dan a continuación varios ejemplos, para el caso de una sonda que entra por el borde inferior de la placa. Se obtendrían las mismas configuraciones en el caso de una sonda que sale por el borde inferior de la placa.

50

La respuesta temporal ideal de la sonda que atraviesa un borde de placa separadora 10 limpia, es decir libre de colmatado o de suciedad, está ilustrada por la figura 5. En esta figura, la curva 50 representa la impedancia compleja en modo absoluto cuando tiene lugar el paso de un borde de una placa separadora 10 limpia. Esta comprende una primera parte 51 que corresponde a una impedancia característica del tubo 11 en ausencia de placa separadora 10, designada Z_{tubo} , y una segunda parte 52 que corresponde a una impedancia característica de la presencia de la placa Z_{placa} .

55

La curva 53 representa la impedancia compleja en modo diferencial cuando tiene lugar el paso de un borde de una placa separadora 10 limpia, en correspondencia con la curva 50. El paso del reborde de placa separadora 10 se traduce por un impulso 54 característico del paso de la impedancia del tubo 11 a la de la placa separadora 10, y que corresponde a $Z_{placa} - Z_{tubo}$.

60

5 La figura 6 muestra la señal Lissajous, con la parte real de la señal de borde inferior deconvolucionada en abscisas y la parte imaginaria en ordenadas. La figura 7 muestra, de manera temporal, arriba, la parte real de la señal de borde inferior deconvolucionada, y en la parte baja la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada. Se representa también la señal de borde superior deconvolucionada, considerándose ésta como referencia que representa un borde de placa separadora 10 limpia. Sin embargo, en estas figuras, la señal de borde inferior y la señal de borde superior están superpuestas, lo cual indica que el borde de placa inferior, o aguas abajo, está limpio, así como el borde de placa superior.

10 Las figuras 8 a 11 ilustran una configuración en la que el borde inferior de placa está colmatado por un depósito de magnetita situado al mismo nivel que el borde inferior de placa.

15 La respuesta temporal ideal de la sonda que atraviesa un borde de placa separadora 10 colmatada se ilustra mediante la figura 8. En esta figura, la curva 80 representa la impedancia compleja en modo absoluto cuando tiene lugar el paso de un borde de una placa separadora 10 colmatada. Esta comprende una primera parte 81 que corresponde a una impedancia característica del tubo 11 en ausencia de placa separadora 10 y de colmatado, designada Z_{tubo} , una segunda parte 82 que corresponde a una impedancia característica de la presencia de un colmatado de magnetita entre el tubo 11 y la placa separadora 10, designada Z_{magn} , y una tercera parte 83 que corresponde a una impedancia característica de la presencia de la placa separadora 10 sin magnetita, designada Z_{placa} .

20 La curva 84 representa la impedancia compleja en modo diferencial cuando tiene lugar el paso de un borde de una placa separadora 10 colmatada, en correspondencia con la curva 80. El inicio del colmatado de magnetita se traduce por un primer impulso 85 característico del paso de la impedancia del tubo a la del depósito de magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{magn}} - Z_{\text{tubo}}$. El final del depósito de magnetita se traduce por un segundo impulso 86 característico del paso de la impedancia del depósito de magnetita a la de la placa y que corresponde a $Z_{\text{placa}} - Z_{\text{magn}}$.

30 La figura 9 muestra una representación en Lissajous que debería presentar una señal ideal representativa del colmatado. Se encuentra una primera firma 95 característica del paso de la impedancia del tubo a la del depósito de magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{magn}} - Z_{\text{tubo}}$. Se encuentra también una segunda firma 96 característica del paso de la impedancia del depósito de magnetita a la de la placa y que corresponde a $Z_{\text{placa}} - Z_{\text{magn}}$.

35 La firma en línea de puntos 97 corresponde a la firma del paso característico del paso de la impedancia del tubo a la de la placa separadora en ausencia de colmatado, y que corresponde a $Z_{\text{placa}} - Z_{\text{magn}}$. Se observa por otro lado que la suma de la primera firma 95 y de la segunda firma 96 corresponde a la firma en línea de puntos 97. En efecto, $Z_{\text{magn}} - Z_{\text{tubo}} + Z_{\text{placa}} - Z_{\text{magn}} = Z_{\text{placa}} - Z_{\text{tubo}}$.

40 Las figuras 10 y 11 ilustran la señal de borde inferior deconvolucionada en el caso del colmatado por un depósito de magnetita. La figura 10 muestra una representación en Lissajous de esta señal de borde inferior deconvolucionada. Se encuentra una primera firma 105 característica del paso de la impedancia del tubo a la del depósito de magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{magn}} - Z_{\text{tubo}}$. Se encuentra también una segunda firma 106 característica del paso de la impedancia del depósito de magnetita a la de la placa y que corresponde a $Z_{\text{placa}} - Z_{\text{magn}}$. La tercera firma 107 corresponde a la firma de la señal de borde superior deconvolucionada, supuestamente limpia.

45 Se constata una muy buena correlación entre el aspecto de la señal de borde inferior deconvolucionada y el aspecto de una señal ideal. En consecuencia, es fácil deducir a partir de la señal de borde inferior deconvolucionada el estado de colmatado del paso foliculado.

50 La figura 11 muestra, de manera temporal, arriba, la parte real de la señal de borde inferior deconvolucionada 110, y abajo la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada 111, en la misma configuración. También están representadas la parte real 112 y la parte imaginaria 113 de la señal de borde superior deconvolucionada, considerándose la señal de borde superior como referencia que representa un borde de placa limpia.

55 Se deduce de las figuras 10 y 11 que la señal de borde inferior, después de la deconvolución, contiene bien dos impulsos complejos, que representan las dos variaciones de impedancia que corresponden al paso de la sonda por los extremos de depósito que colmata el paso foliculado.

60 Las figuras 12 a 15 ilustran una configuración en la que un depósito formado por un anillo de magnetita está presente en el tubo, por debajo del borde inferior de la placa separadora.

65 La respuesta temporal ideal de la sonda cerca de este anillo de magnetita y de este borde de placa separadora, se ilustra mediante la figura 12. En esta figura, la curva 120 representa la impedancia compleja en modo absoluto. Esta comprende una primera parte 121 que corresponde a una impedancia característica del tubo en ausencia de placa separadora y de colmatado, designada Z_{tubo} , una segunda parte 122 que corresponde a una impedancia característica de la presencia de un anillo de magnetita a lo largo del tubo, designada Z_{magn} , una tercera parte 123

que corresponde a la parte del tubo entre el depósito y la placa, y cuya impedancia es Z_{tubo} , y finalmente una cuarta parte 124 que corresponde a una impedancia característica de la presencia de la placa separadora 10 sin magnetita, designada Z_{placa} .

5 La curva 125 representa la impedancia compleja en modo diferencial cuando tiene lugar el paso de la sonda cerca de este anillo de magnetita y de este borde de placa separadora, en correspondencia con la curva 120. El inicio de esta configuración. Se encuentra una primera firma 136 característica del paso de la impedancia del tubo a la del depósito de magnetita se traduce por un primer impulso 126 característico del paso de la impedancia del tubo a la del depósito de magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{magn}}-Z_{\text{tubo}}$. El final del depósito de magnetita se traduce por un segundo impulso 127 característico del paso de la impedancia del depósito de magnetita a la del tubo, y que
10 corresponde a $Z_{\text{tubo}}-Z_{\text{magn}}$. El reborde de la placa separadora se traduce por un tercer impulso 128 característico del paso de la impedancia del tubo a la de la placa separadora, y que corresponde a $Z_{\text{placa}}-Z_{\text{tubo}}$.

La figura 13 muestra una representación en Lissajous que debería presentar una señal ideal representativa de esta configuración. Se encuentra una primera firma 136 característica del paso de la impedancia del tubo a la del anillo de depósito de magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{magn}}-Z_{\text{tubo}}$. Se encuentra también una segunda firma 137
15 característica del paso de la impedancia del depósito de magnetita a la del tubo, y que corresponde a $Z_{\text{tubo}}-Z_{\text{magn}}$. Se debe observar que lógicamente la segunda firma 137 es opuesta a la primera firma 136. Se encuentra finalmente una tercera firma 138 característica del paso de la impedancia del tubo a la de la placa, y que corresponde a $Z_{\text{placa}}-Z_{\text{tubo}}$.

Las figuras 14 y 15 ilustran la señal de borde inferior deconvolucionada en la configuración con un anillo de depósito de magnetita. La figura 14 muestra una representación en Lissajous de esta señal de borde inferior deconvolucionada. Se encuentra una primera firma 146 característica del paso de la impedancia del tubo a la del anillo de depósito de magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{magn}}-Z_{\text{tubo}}$. Se encuentra también una segunda firma 147
20 característica del paso de la impedancia del depósito de magnetita a la del tubo, y que corresponde a $Z_{\text{tubo}}-Z_{\text{magn}}$. Se debe observar que lógicamente la segunda firma 147 es opuesta a la primera firma 146. Así, se observan dos picos, es decir unas firmas, de suma nula con una energía importante sobre la parte imaginaria.

Se encuentra finalmente una tercera firma 148 característica del paso de la impedancia del tubo a la de la placa, y
25 que corresponde a $Z_{\text{placa}}-Z_{\text{tubo}}$. La cuarta firma 149 corresponde a la firma de la señal de borde superior deconvolucionada, supuestamente limpia. Se debe observar en este caso que la proximidad del anillo de magnetita con el borde inferior de la placa separadora provoca una mezcla entre la segunda firma 147 y la tercera firma 148.

Se constata una correlación muy buena entre el aspecto de la señal de borde inferior deconvolucionada y el
30 aspecto de una señal ideal. En consecuencia, es fácil deducir a partir de la señal de borde deconvolucionada la configuración del colmatado del paso foliculado.

La figura 15 muestra, de manera temporal, arriba, la parte real de la señal de borde inferior deconvolucionada 150, y abajo, la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada 151, en la misma configuración. También
35 están representadas la parte real 152 y la parte imaginaria 158 de la señal de borde superior deconvolucionada, considerándose la señal de borde superior como referencia que representa un borde de placa limpia.

Se encuentra, para la parte real de la señal de borde inferior deconvolucionada, un pico 153 que corresponde al paso de placa limpia, y dos picos 154, 155, de suma nula, reveladores de la presencia del anillo de magnetita. Se encuentran dos picos correspondientes 156, 157 para la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada. Se debe observar, para la parte imaginaria, la ausencia esperada de pico que corresponde al paso de borde de placa limpia.

Las figuras 16 y 19 ilustran una configuración en la que un tubo ensuciado sobre su longitud por un depósito de magnetita presenta una ruptura de ensuciado por debajo del borde inferior de la placa separadora.
40

La respuesta temporal ideal de la sonda cerca de esta ruptura de ensuciado y de este borde de placa separadora se ilustra mediante la figura 16. En esta figura, la curva 160 representa la impedancia compleja en modo absoluto. Esta comprende una primera parte 161 que corresponde a una impedancia característica del tubo ensuciado por la magnetita, designada Z_{ens} , una segunda parte 162 que corresponde a una impedancia característica del tubo en ausencia de magnetita, designada Z_{tubo} , a nivel de la ruptura del ensuciado del tubo, y una tercera parte 163 a una impedancia característica de la presencia de la placa separadora 10 sin magnetita, designada Z_{placa} .
45

La curva 165 representa la impedancia compleja en modo diferencial cuando tiene lugar el paso de la sonda de esta ruptura de ensuciado y del borde de placa separadora, en correspondencia con la curva 160. La ruptura de ensuciado por la magnetita se traduce por un primer impulso 166 característico del paso de la impedancia del tubo ensuciado a la del tubo sin magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{tubo}}-Z_{\text{ens}}$. El paso del reborde de la placa separadora se traduce por un segundo impulso 167 característico del paso de la impedancia del tubo a la de la placa separadora, y que corresponde a $Z_{\text{placa}}-Z_{\text{tubo}}$.
50

La figura 17 muestra una representación en Lissajous que debería presentar una señal ideal representativa de

esta configuración. Se encuentra una primera firma 176 característica del paso de la impedancia del tubo ensuciado a la del tubo sin magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{tubo}}-Z_{\text{ens}}$. Se encuentra también una segunda firma 177 característica del paso de la impedancia del tubo a la de la placa, y que corresponde a $Z_{\text{placa}}-Z_{\text{tubo}}$.

5 Las figuras 18 y 19 ilustran la señal de borde inferior deconvolucionada en la configuración del tubo con una ruptura de ensuciado. La figura 18 muestra una representación en Lissajous de esta señal de borde inferior deconvolucionada. Se encuentra una primera firma 186 característica del paso de la impedancia del tubo ensuciado a la del tubo libre de magnetita, y que corresponde a $Z_{\text{tubo}}-Z_{\text{ens}}$. Se encuentra también una segunda firma 187 característica del paso de la impedancia del tubo a la de la placa, y que corresponde a $Z_{\text{placa}}-Z_{\text{tubo}}$.

10 Se constata una correlación muy buena entre el aspecto de la señal de borde inferior deconvolucionada y el aspecto de una señal ideal. En consecuencia, es fácil deducir a partir de la señal de borde inferior deconvolucionada la presencia de una ruptura de ensuciado del tubo.

15 La figura 19 muestra, de manera temporal, arriba, la parte real de la señal de borde inferior deconvolucionada 190, y abajo la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada 191, en la misma configuración. También están representadas la parte real 192 y la parte imaginaria 193 de la señal de borde superior deconvolucionada, considerándose la señal de borde superior como referencia que representa un borde de placa limpia.

20 Se encuentra, para la parte real de la señal de borde inferior deconvolucionada, un pico positivo 194 que corresponde al paso de placa limpia, y un pico negativo 195 que corresponde a la presencia de una ruptura de ensuciado. Se encuentra un pico negativo 196 para la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada. Se debe observar, para la parte imaginaria, la ausencia esperada de pico que corresponde al paso del borde de placa limpia.

25 Los ejemplos podrían todavía multiplicarse. Puede deducirse de ellos que el procedimiento según la invención permite interpretar físicamente los aspectos de la señal compleja deconvolucionada. Unos simples indicadores pueden adelantarse para deducir el estado de los pasos foliculados de una placa separadora. Así, la señal compleja deconvolucionada representa directamente el estado de la placa separadora a través de los diferentes tipos de variación de impedancia que pone en evidencia.

30 Para una placa separadora limpia, la parte imaginaria de la señal compleja deconvolucionada presenta una potencia nula.

35 En presencia de un borde de placa inferior colmatado:

- la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada presenta una potencia importante;
- la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada no presenta ningún signo constante;
- la parte imaginaria de la señal de borde inferior deconvolucionada contiene tanta potencia en sus valores positivos como en sus valores negativos.

45 Se pueden detectar también otras configuraciones. Por ejemplo, en el caso de un tubo ensuciado, una ruptura de ensuciado cerca de la placa separadora puede ser detectada por el hecho de que:

- la parte imaginaria de la señal compleja deconvolucionada tiene una potencia importante;
- la parte imaginaria de la señal compleja deconvolucionada es de signo constante.

50 Así, el procedimiento según la invención permite mejorar mucho la evaluación del estado de colmatado de los pasos foliculados, permitiendo en particular distinguir diferentes configuraciones, por ejemplo una ruptura de ensuciado, que podrían pasar por colmatado con unos métodos menos precisos.

55 Más precisamente, se pueden definir unos indicadores para facilitar el análisis de la señal de borde inferior. El análisis de la señal de borde inferior deconvolucionada puede comprender así la definición de indicadores que corresponden a unos pares de extremos de magnitudes físicas de la parte imaginaria de la señal de borde inferior. Por ejemplo, se pueden utilizar los indicadores siguientes para la estimación del colmatado o del ensuciado:

60 Si se denomina y_+ (respectivamente y_-) los valores positivos (respectivamente negativos) tomados por la parte imaginaria de la señal obtenida cerca del borde inferior de la placa después de la deconvolución, y si se definen las diferentes magnitudes siguientes:

- E_{y_+} / E_{y_-} : energía de y_+ y de y_- .
- P_{y_+} / P_{y_-} : potencia de y_+ y de y_- .
- M_{y_+} / M_{y_-} : valor máximo de y_+ y de $|y_-|$.
- $\Gamma_{y_+} / \Gamma_{y_-}$: desviación estándar de los valores tomados por y_+ y por y_- .

Para cada par de magnitudes físicas, X_{Y+} / X_{Y-} , con X correspondiendo a E, P, M o Γ , se define un indicador mínimo y un indicador máximo:

- 5
- $X_{\min} = \min \{ X_{Y+}, X_{Y-} \}$
 - $X_{\max} = \max \{ X_{Y+}, X_{Y-} \}$

Según las interpretaciones anteriores, se tiene una correspondencia simple entre los indicadores X_{\min} , X_{\max} y el estado de la placa:

- 10
- Placa separadora limpia: X_{\min} y X_{\max} son débiles;
 - Ruptura de ensuciado cerca del borde inferior: X_{\min} es débil, X_{\max} es fuerte;
 - Borde interior colmatado : X_{\min} y X_{\max} son fuertes y aproximadamente iguales.

- 15
- Se pueden utilizar asimismo otros indicadores, mirando la proyección de la señal de borde inferior deconvolucionada sobre una familia de funciones (funciones gaussianas por ejemplo).

- 20
- La invención se refiere asimismo a un producto programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código de programa registradas en un soporte utilizable en un ordenador para la ejecución de etapas de tratamiento del procedimiento de evaluación del colmatado, cuando se ejecuta dicho programa en un ordenador.

- 25
- De este modo, la señal de medición es transmitida desde la sonda de corriente de Foucault a una memoria para ser almacenada con vistas a su tratamiento. Este tratamiento de la señal de medición al cual se refiere la presente invención se realiza mediante una unidad de tratamiento provista de una calculadora, típicamente un ordenador provisto de medio de visualización y de comunicación, por los cuales adquiere la señal de medición y transmite los resultados de la realización del procedimiento de evaluación del colmatado, estando dicho ordenador configurado para realizar el procedimiento según la invención.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de evaluación del colmatado de pasos de una placa separadora (10) de un intercambiador térmico de tubos (11), estando dichos pasos (12a, 12b) dispuestos a lo largo de los tubos (11) para que un fluido atraviese la placa separadora (10), en el que se hace circular en un tubo (11) de dicho intercambiador una sonda de corrientes de Foucault y se mide con ésta una señal de medición función del entorno en el que se encuentra la sonda, y en el que para evaluar la obturación a nivel del borde aguas abajo de una placa separadora:

- se determina a partir de la señal de medición una señal de borde inferior que corresponde al paso del borde aguas abajo de la placa separadora (10) por la sonda,
- se determina a partir de la señal de medición una señal de borde superior que corresponde al paso del borde aguas arriba de la placa separadora (10) por la sonda,
- se determina una estimación de la respuesta impulsional de la sonda que corresponde al paso de la placa separadora (10) por la sonda en el tubo (11) y que es representativa de la respuesta de la sonda de corrientes de Foucault a una variación de impedancia,

estando el procedimiento caracterizado por que:

- se realiza una deconvolución (S30) de la señal de borde inferior mediante dicha estimación de la respuesta impulsional que corresponde al paso de la placa separadora (10) por la sonda en el tubo (11) y que es representativa de la respuesta de la sonda de corrientes de Foucault a una variación de impedancia,
- se evalúa el colmatado (S33) del paso a nivel del borde aguas abajo de una placa separadora analizando (S32) la señal de borde inferior así deconvolucionada mediante la estimación de la respuesta impulsional.

2. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que la sonda adquiere por lo menos en parte la señal de medición en modo diferencial.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la señal de medición es una señal multifrecuencia compuesta por lo menos por dos señales a unas frecuencias diferentes, y la señal de borde inferior y la señal de borde superior resultan de combinaciones lineales de por lo menos dos señales a unas frecuencias diferentes de dicha señal de medición.

4. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que la combinación lineal hace intervenir por lo menos un coeficiente complejo optimizado para minimizar la potencia de señal a lo largo del tubo fuera de las zonas de placa.

5. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que la respuesta impulsional de la sonda se estima a partir de la señal de borde superior.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la deconvolución (S30) de la señal de borde inferior mediante la estimación de la respuesta impulsional de la sonda se realiza utilizando un filtro construido a partir de dicha estimación de respuesta impulsional.

7. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que la respuesta en frecuencia de filtro es una aproximación de la inversa de la transformada de Fourier de la respuesta impulsional de la sonda.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 6 o 7, en el que el filtro es un filtro de Wiener y la deconvolución es una deconvolución de Wiener.

9. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que la respuesta en frecuencia del filtro de Wiener es de la forma:

$$G[f] = \frac{H^*[f]}{\|H[f]\|^2 + \frac{B[f]}{S[f]}}$$

con el exponente * designando la conjugación compleja, H[f] la transformada de Fourier de la respuesta impulsional de la sonda, S[f] la densidad espectral de potencia de la señal a estimar y B[f] la densidad espectral de potencia del ruido.

10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se aplica un filtrado (S31) por un filtro de paso bajo a la señal de borde inferior deconvolucionada, siendo la frecuencia de corte de dicho filtro de

paso bajo determinada mediante una desviación estándar de una función gaussiana que constituye una aproximación de la parte real de un impulso de la señal que corresponde al paso de un borde de placa separadora por la sonda.

- 5 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el análisis de la señal de borde inferior deconvolucionada comprende el análisis de la parte real y de la parte imaginaria de dicha señal de borde inferior deconvolucionada.
- 10 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el análisis de la señal de borde inferior deconvolucionada comprende la definición de indicadores que corresponden a unos pares de extremos de magnitudes físicas de la parte imaginaria de la señal de borde inferior.
- 15 13. Producto programa de ordenador que comprende unas instrucciones de código de programa para la ejecución del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

FIG 1

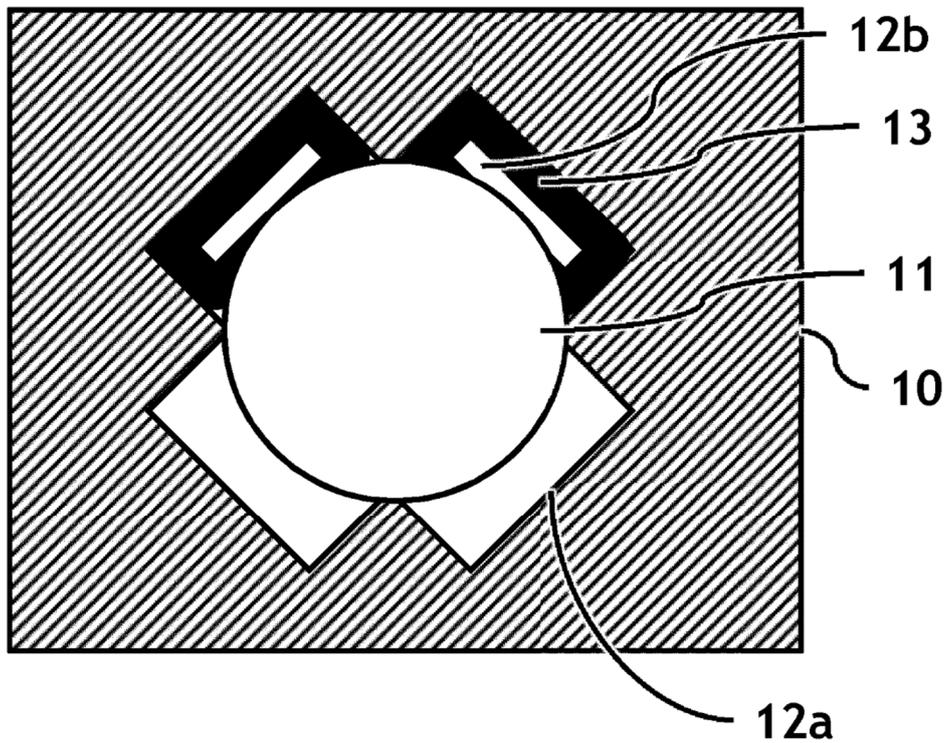


FIG 2

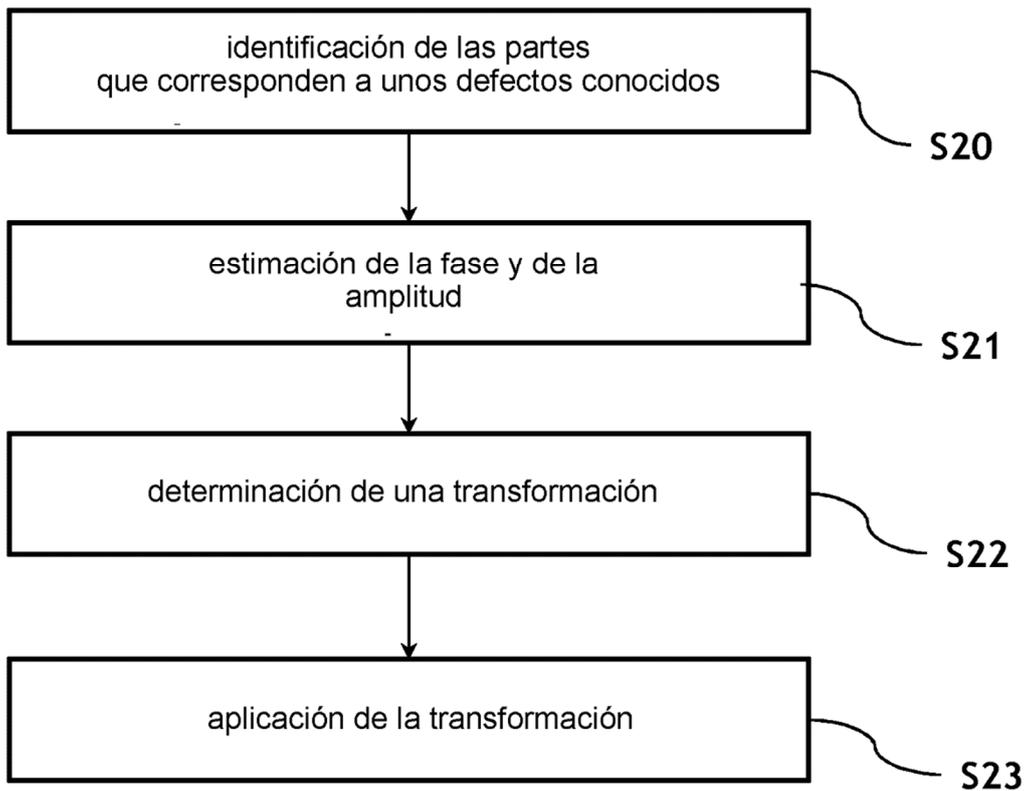
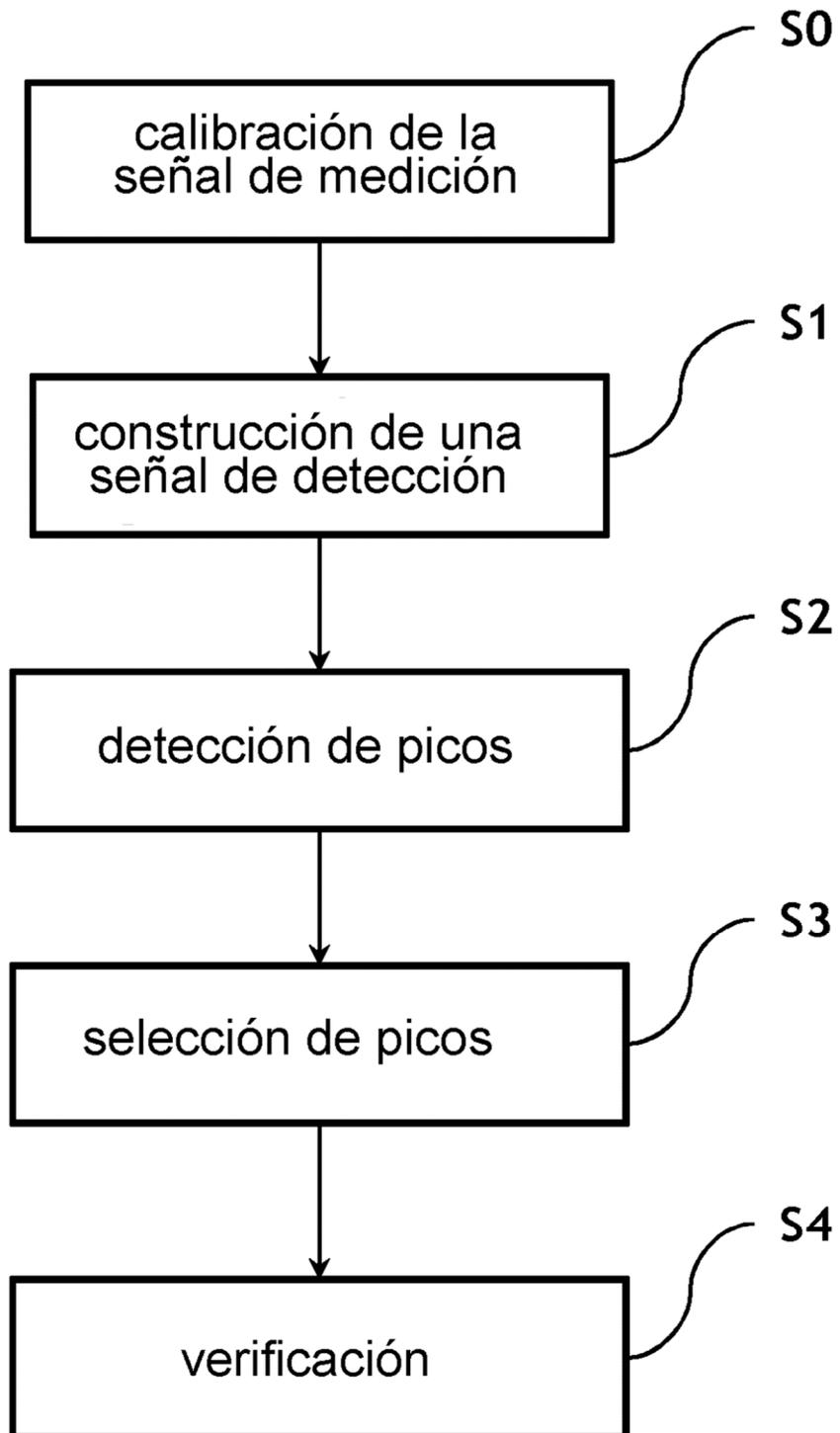


FIG 3



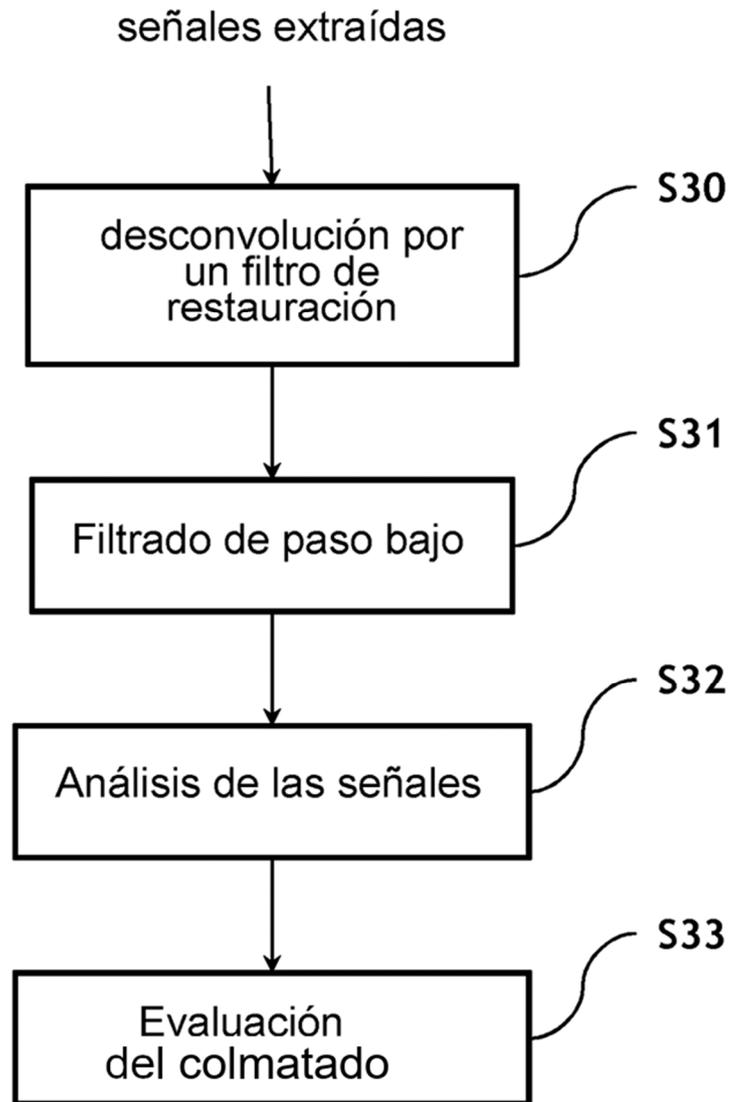


FIG 4

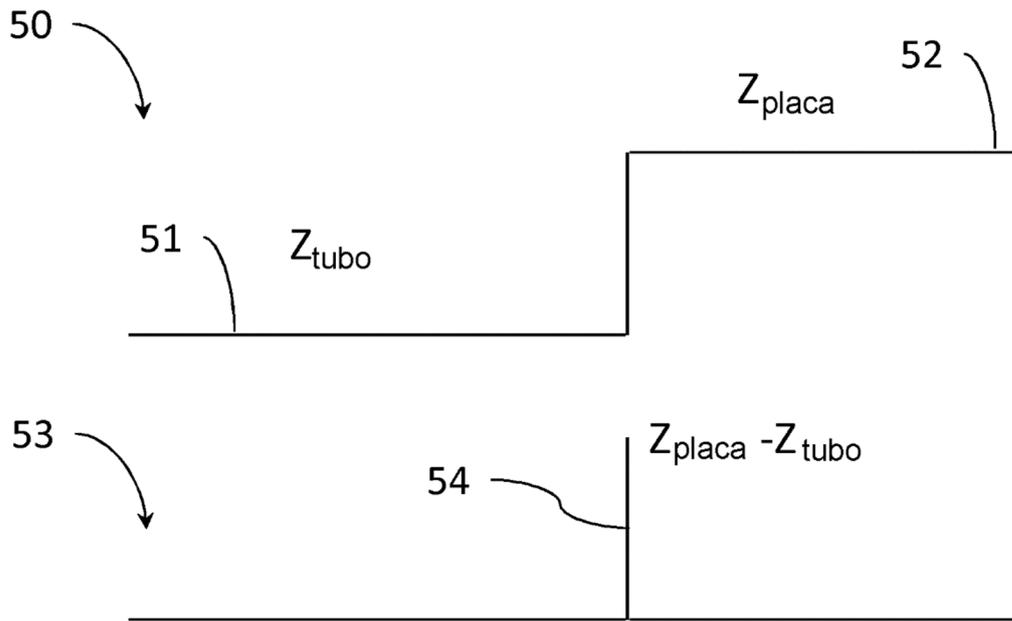


FIG 5

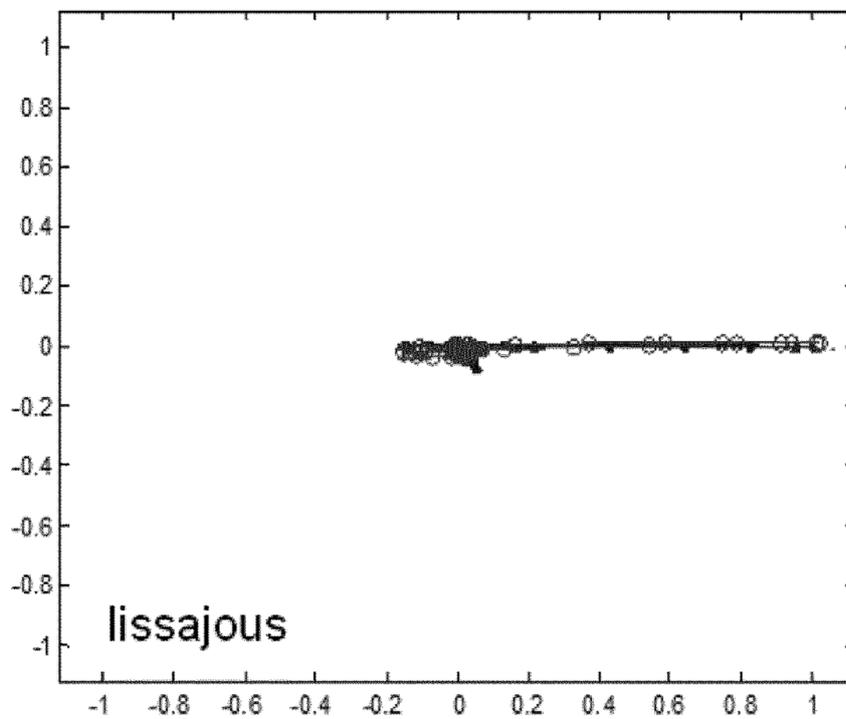


FIG 6

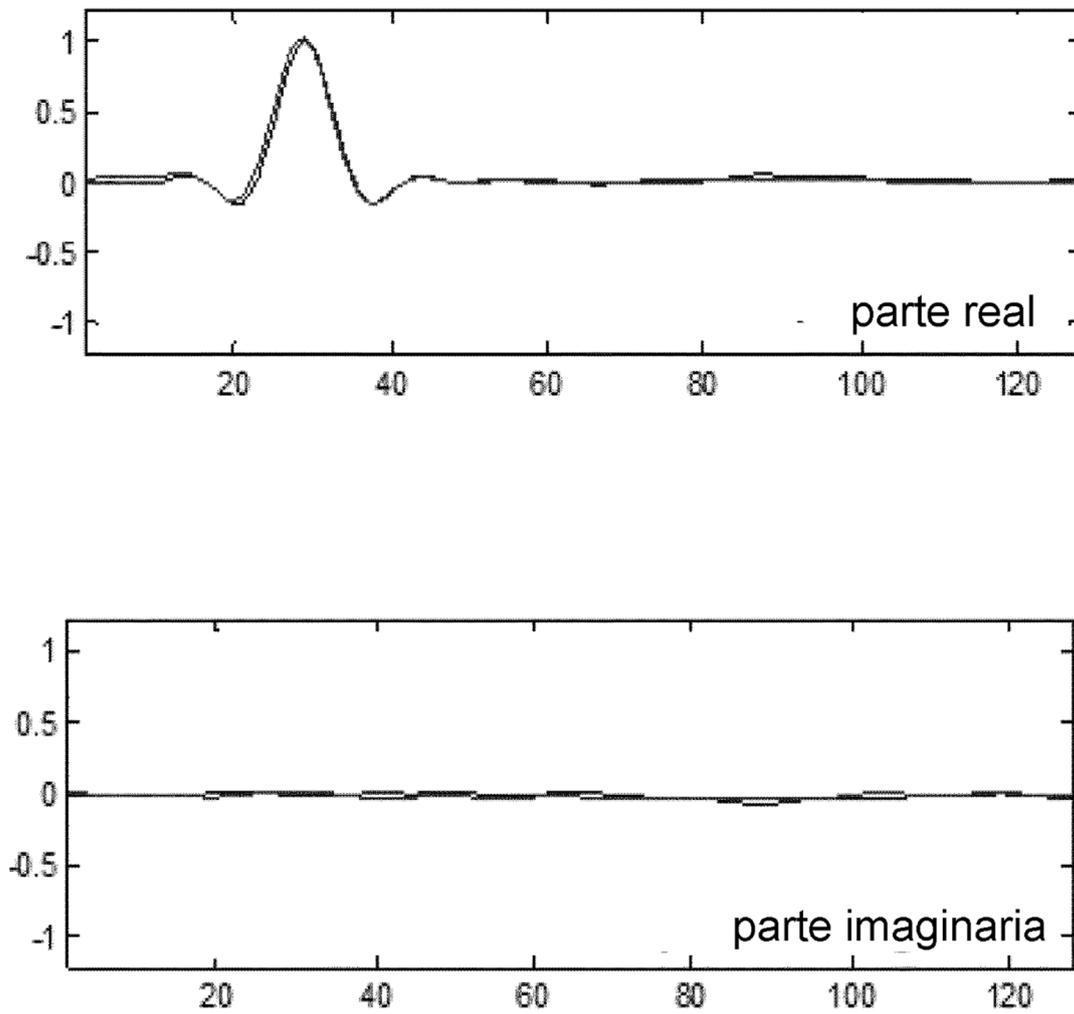
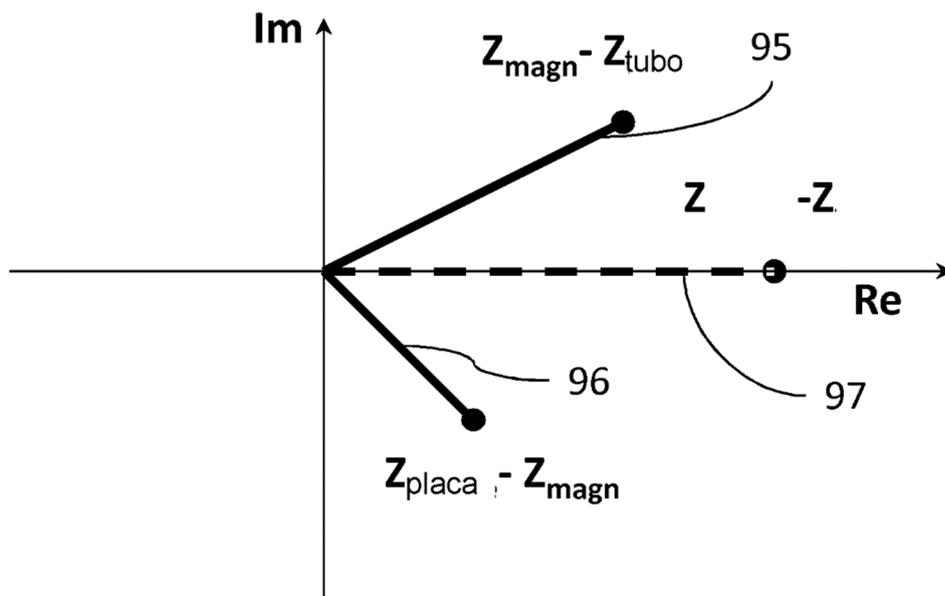
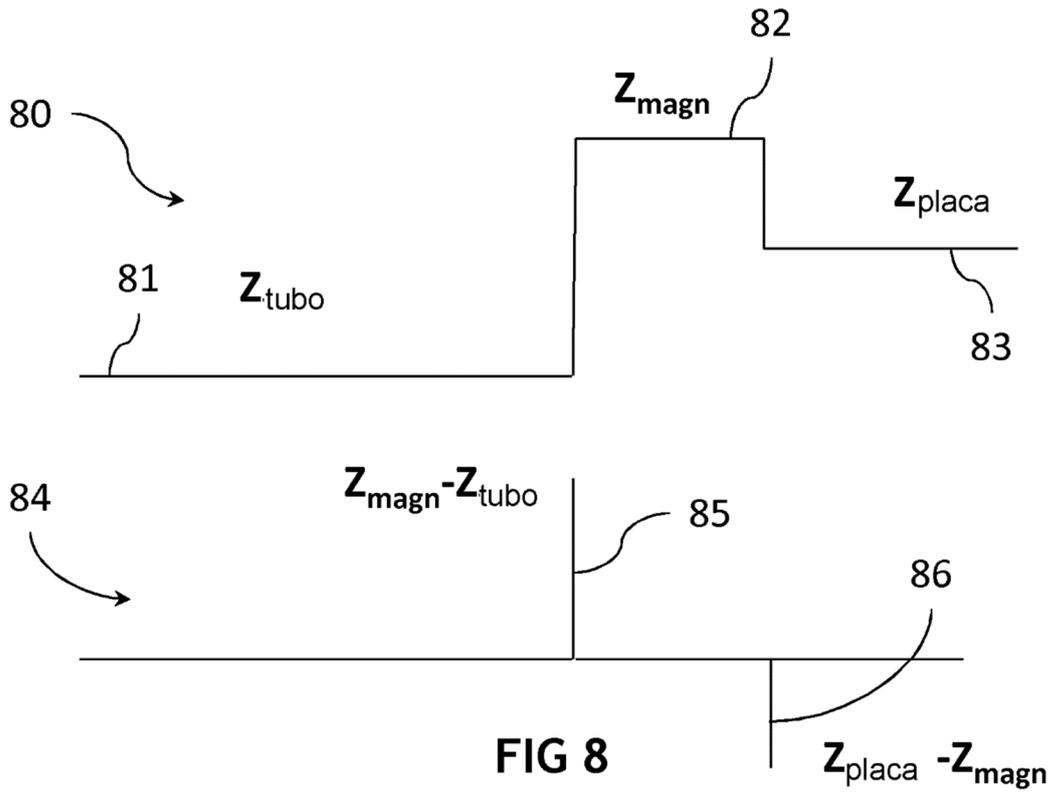


FIG 7



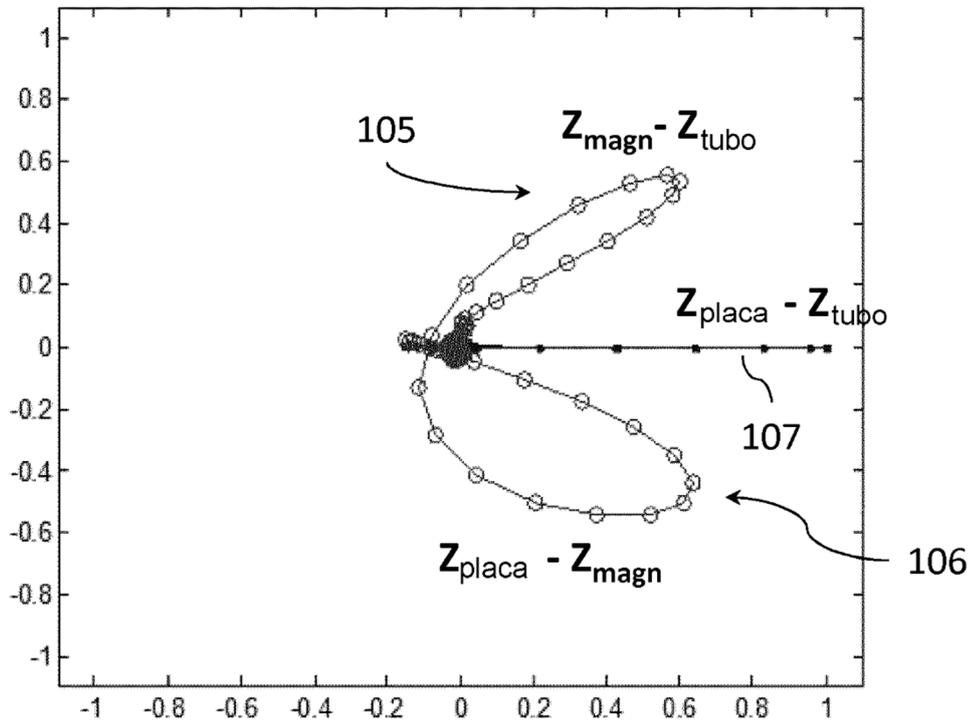


FIG 10

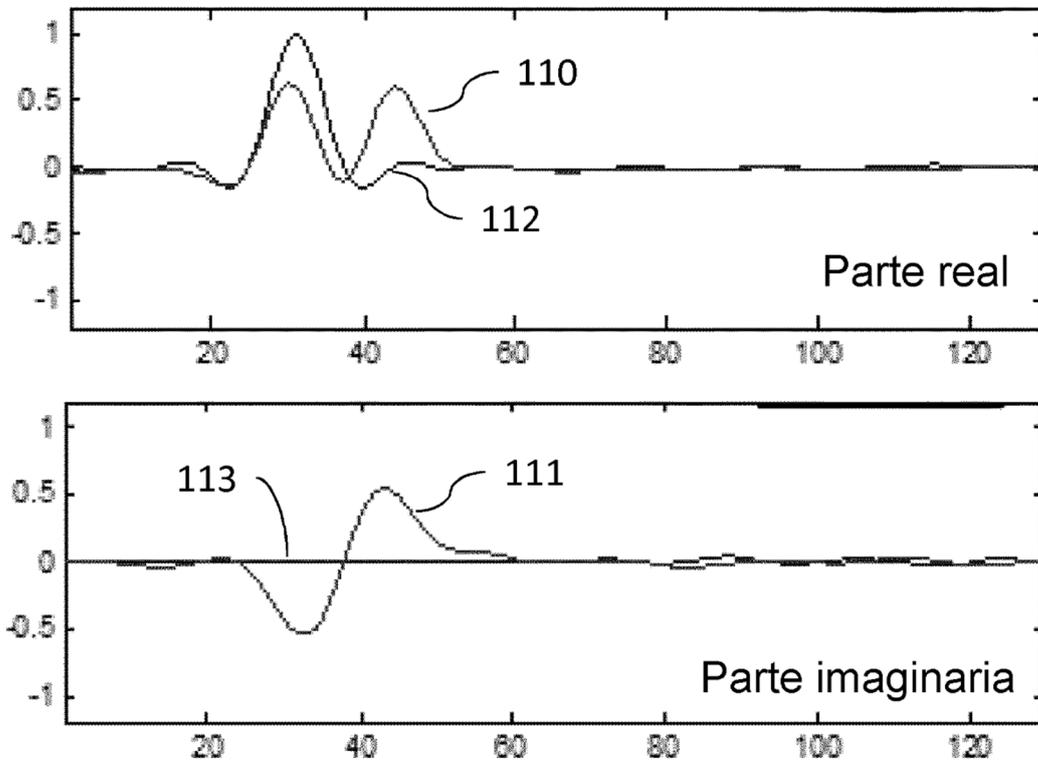


FIG 11

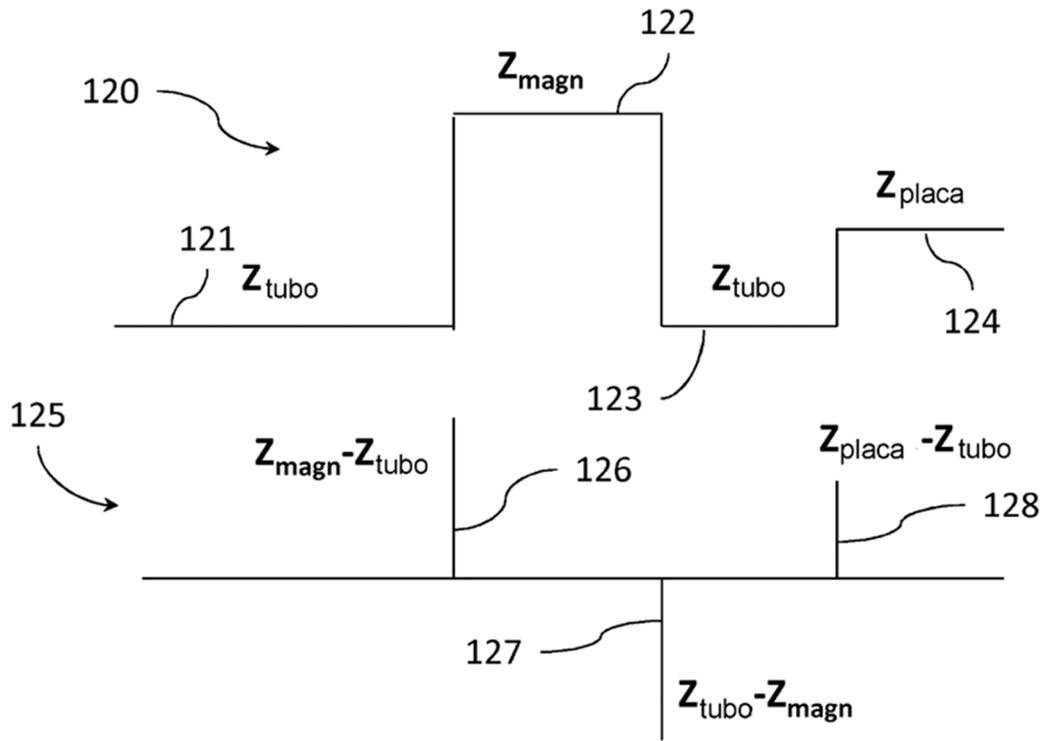


FIG 12

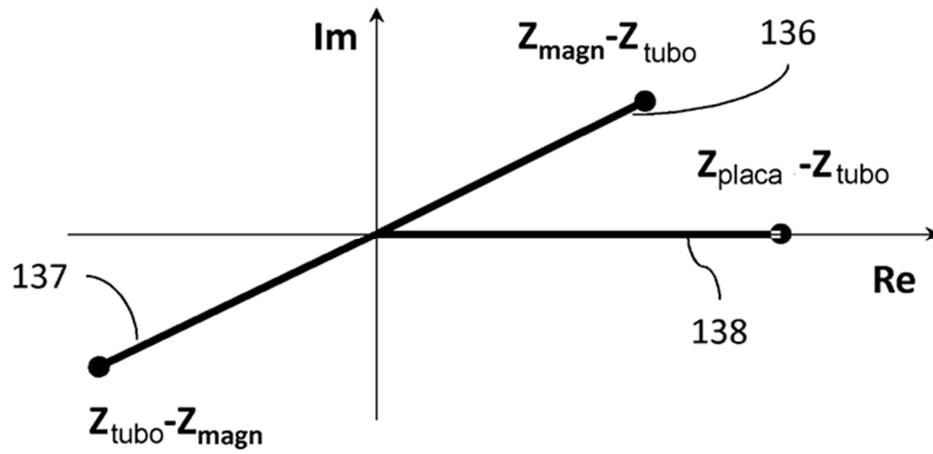


FIG 13

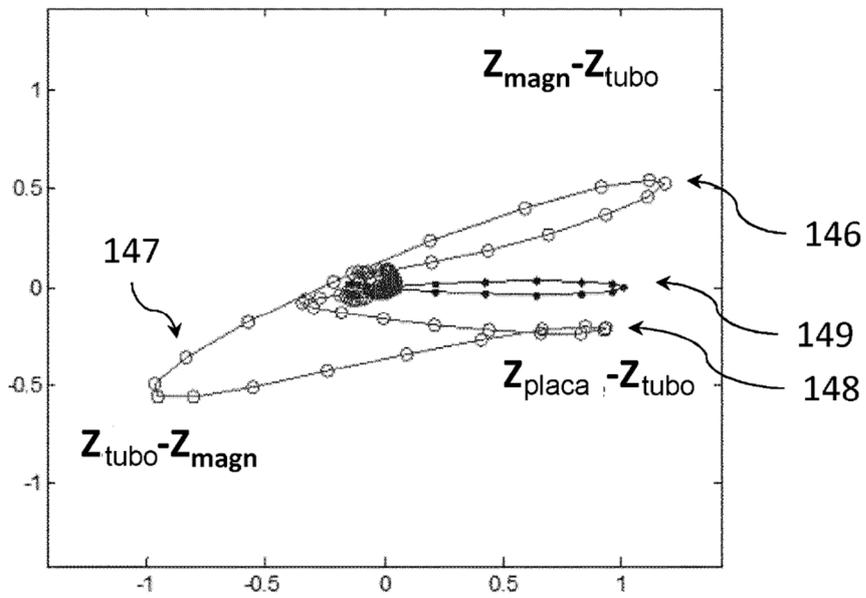


FIG 14

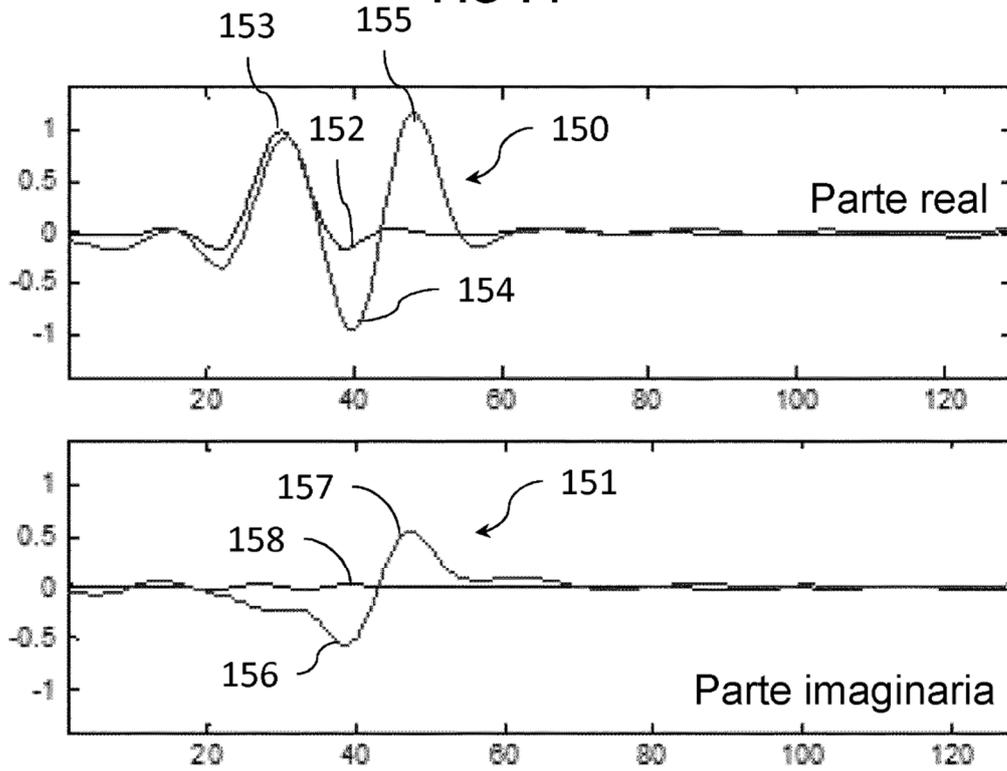


FIG 15

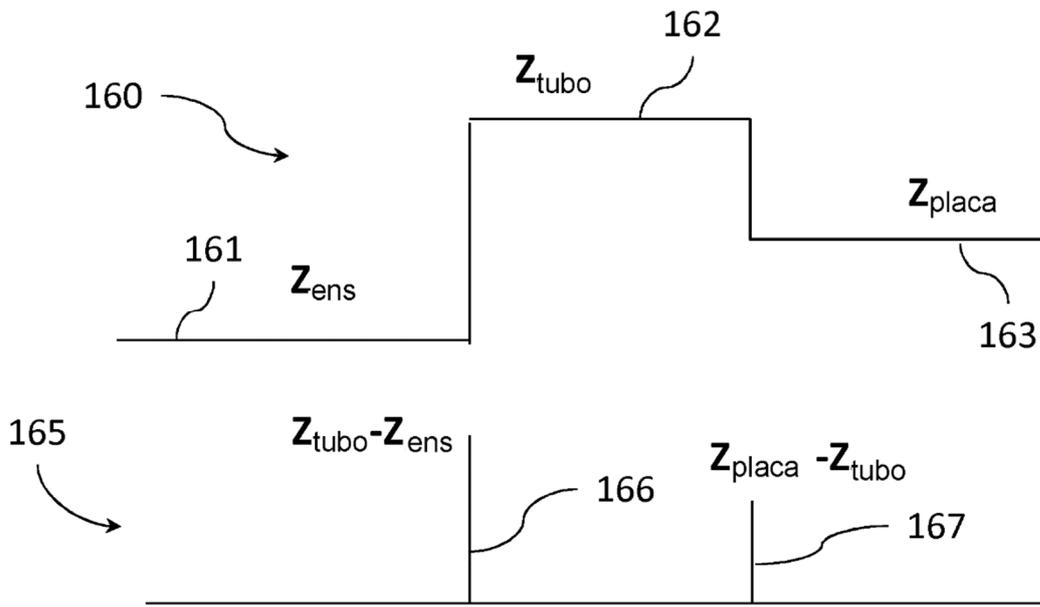


FIG 16

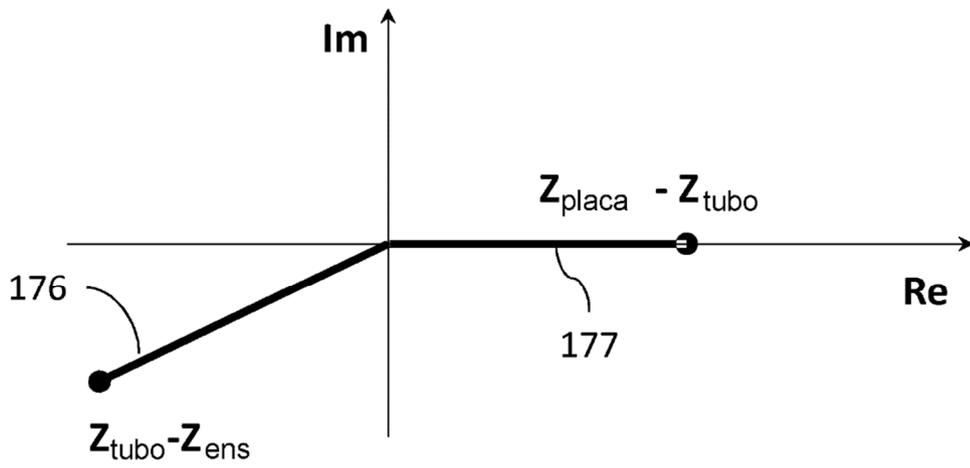


FIG 17

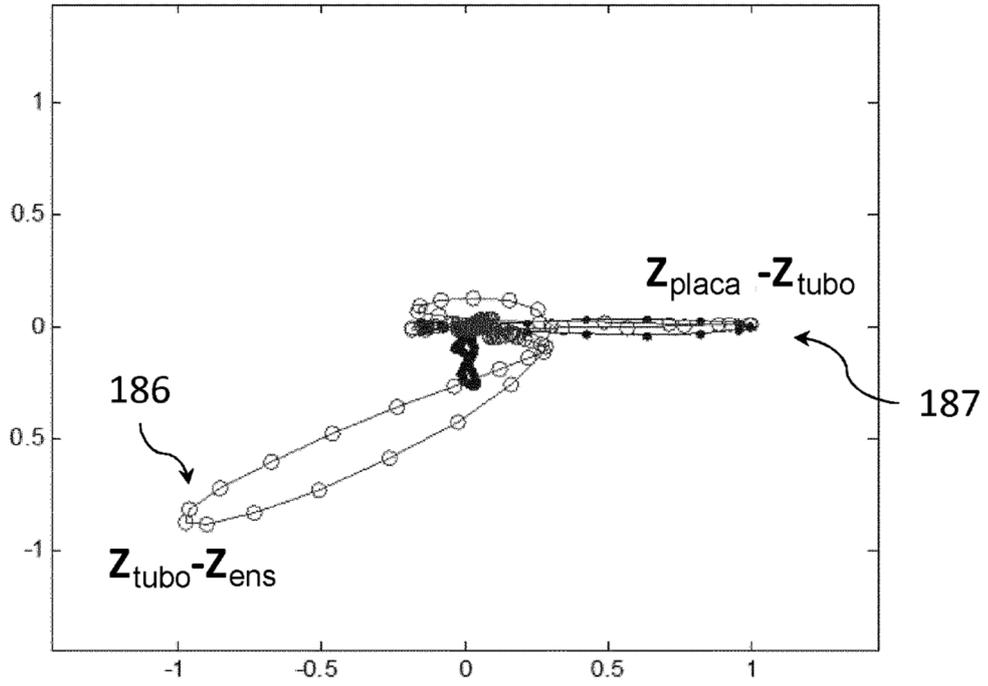


FIG 18

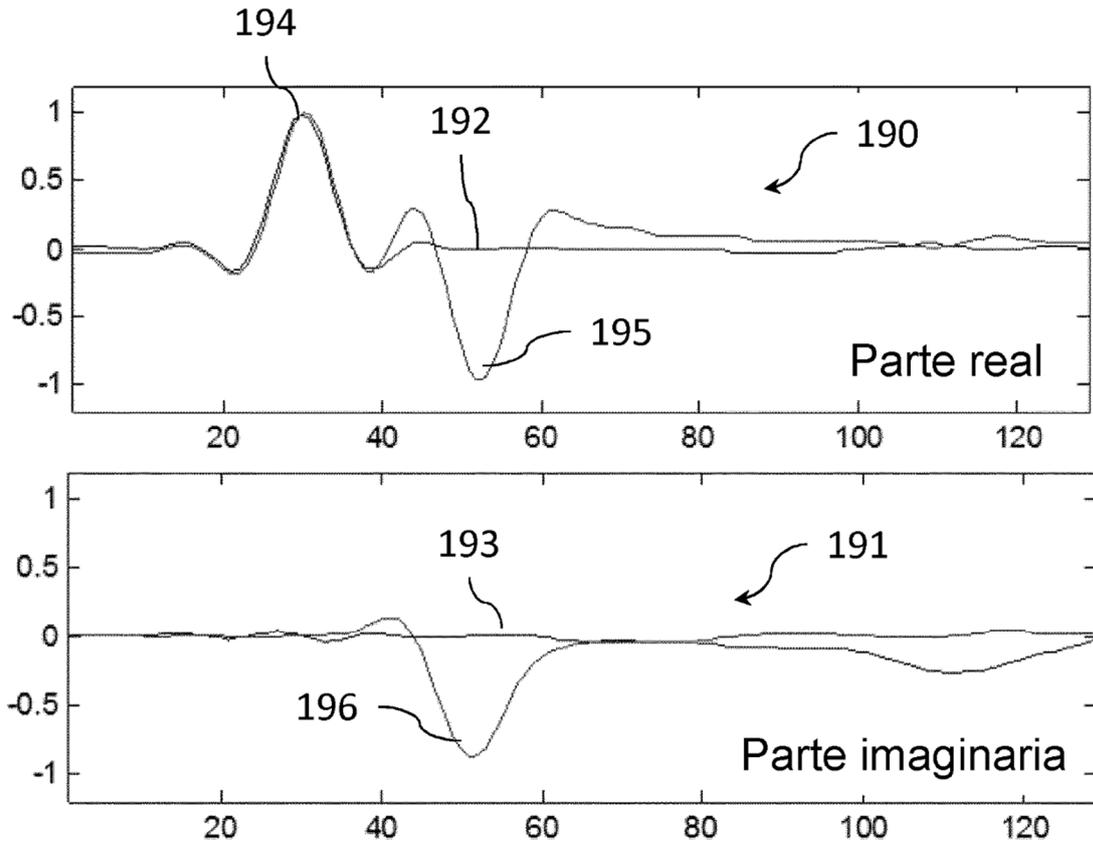


FIG 19