

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 655 520**

51 Int. Cl.:

**G05B 23/02** (2006.01)

**G21C 17/017** (2006.01)

**G01N 27/90** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.12.2014 PCT/EP2014/079163**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.07.2015 WO15097221**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.12.2014 E 14819020 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.10.2017 EP 3087444**

54 Título: **Procedimiento de estimación cuantitativa del colmatado de las placas de un generador de vapor**

30 Prioridad:

**23.12.2013 FR 1363489**

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

**20.02.2018**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**RENARD, BRUNO y  
PAUL, NICOLAS**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

ES 2 655 520 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 estimación cuantitativa del colmatado de las placas de un generador de vapor.

**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 de calor de tubos, estando dichos pasos dispuestos a lo largo de los tubos y sirviendo para la circulación de un fluido en dicho intercambiador de calor 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 de este modo producir 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 constituida de este modo por un haz tubular, compuesto por 3500 a 5600 tubos, según el modelo, por los cuales 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 generalmente en 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, deposita todos los materiales que contenía. Si los depósitos de material se realizan en los lóbulos, disminuyen el paso libre: esto es el colmatado, que por tanto es la obturación progresiva, por depósitos, de los orificios destinados al paso de la mezcla agua/vapor.

La figura 1 ilustra esquemáticamente una vista desde arriba de un paso foliculado en una placa separadora 10, por el cual 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 de este modo 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 de este modo favorece la aparición de vibraciones excesivas de los tubos, así como la inducción de tensiones mecánicas importantes sobre las estructuras internas del generador de vapor. Esta degradación presenta, por tanto, unos efectos al mismo tiempo en la seguridad y en las prestaciones de las instalaciones. Por tanto, es indispensable conocer bien la naturaleza y la evolución de esta degradación.

Por tanto, se pretende estimar la tasa de colmatado de estos pasos. Esta tasa de colmatado corresponde a la relación entre la superficie taponada de estos pasos y la superficie total de éstos. Más generalmente, se trata de realizar una evaluación cuantitativa de esta tasa de colmatado.

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). 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 ambiente en el que se encuentra la sonda, a partir de la cual se puede obtener información relacionada con anomalías en el intercambiador de calor.

Una variación de la inducción magnética, normalmente mediante una bobina por la cual circula una corriente alterna, genera corrientes de Foucault, de la cual se detecta la variación inducida del campo magnético. Normalmente, 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 ha

utilizado en las detenciones de tramo, en particular para inspeccionar la totalidad de los tubos del generador de vapor.

5 Esta sonda de corriente de Foucault, destinada inicialmente a la detección de daño de los tubos, también es sensible al colmatado. Además, en la actualidad, la interpretación de esta señal es realizada manualmente 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 la obtención de medidas a partir de un programa informático de análisis da lugar, a menudo, a un sesgo difícil de cuantificar.

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, efectuándose generalmente de manera empírica en vista de la señal recibida.

15 El artículo "Tube Support Plate Blockage Evaluation with Televisual Examination and Eddy Current Analysis" de L. Châtelier *et al.*, AIP Conference proceedings, vol.1096, 25 de julio de 2008, páginas 766, 773, describe la determinación de una tasa de colmatado por medio del cálculo de un indicador denominado relación SAX  $r_{\text{sax}}$ , que es un indicador escalar que permite medir el nivel de colmatado a partir de la diferencia de amplitud de las señales por los dos lados de la placa separadora. Esta relación  $r_{\text{sax}}$  se define como una relación entre el diferencial de amplitud entre los bordes superior e inferior de la placa separadora a nivel del paso del tubo a través de la placa separadora, y el máximo de los dos:

$$r_{\text{sax}} = \frac{|Y_1 - Y_2|}{\text{máx}(Y_1, Y_2)}$$

25 Se demuestra una correlación entre los valores recogidos mediante la relación SAX y la tasa de colmatado determinada por el examen televisivo de los pasos de las placas separadoras. Sin embargo, la correlación se limita a tasas de colmatado inferiores al 50%, y, debido a la falta de precisión entre el valor de la relación SAX y la tasa de colmatado, la precisión obtenida no es buena, de manera que solamente es posible obtener una estimación amplia del colmatado, por clases de colmatado (0-15%, 15-25%, 25-50%).

30 Además, esta correlación entre la relación SAX y la tasa de colmatado estimada por el examen televisivo depende del tipo de generador de vapor. Además, en caso de perturbaciones, lo cual es habitual dado que la sonda de corriente de Foucault reacciona a todos los defectos, la relación SAX integra todas estas perturbaciones y entonces no es representativa del colmatado. Por ejemplo, una ruptura de incrustaciones cerca del borde de placa separadora influye en la señal de la sonda de corriente de Foucault, y por tanto, en la relación SAX, ya que ésta no permite discriminar las causas de perturbación.

35 El documento EP 2 474 826 A1 propone un procedimiento de evaluación del colmatado, en el que se obtienen mediciones por corriente de Foucault, y se identifican las señales correspondientes a los pasos de las placas separadoras, y después, se determina un valor medio, que se utiliza como señal de evaluación. A continuación, se utilizan unas características extraídas de estas señales como indicadores de colmatado y se deduce una tasa de colmatado. Por ejemplo, se puede utilizar la distancia entre los puntos extremos de una representación Lissajous para determinar la tasa de colmatado, por medio de una curva de calibración predeterminada que relaciona dicha distancia con una tasa de colmatado.

45 En otro ejemplo, se realiza la comparación por medio de una ecuación predeterminada. Se describe la ecuación como habiéndose obtenido por medio de datos recogidos en un dispositivo cuyas características de colmatado son conocidas. La tasa de colmatado corresponde al resultado de la ecuación que toma como variables los indicadores de colmatado.

50 Estos métodos implican, por tanto, una predeterminación de un modelo que se traduce o bien en una curva de calibración o bien en una ecuación. Por tanto, suponen una relación sencilla entre las características extraídas y la tasa de colmatado, y suponen que una tasa de colmatado se traduce en una misma forma de señal. Ahora bien, resulta que este no es el caso, y que una misma tasa de colmatado puede proporcionar unas señales variadas, y que, por consiguiente, no es posible establecer un modelo simplemente la relación entre la señal de medición y la tasa de colmatado. Por tanto, estos métodos no permiten una apreciación correcta de la tasa de colmatado.

60 El documento EP 2 584 254 A2, en un contexto similar al anterior, propone un procedimiento destinado a prever la evolución del colmatado determinando, para cada paso de placa separadora, el ritmo de colmatado. Con este fin, se prevé un modelo de visualización de las placas separadoras que ilustra el colmatado de los pasos, y su evolución. Esta evolución se determina por medio de una curva de colmatado que está determinada por unas mediciones a través de unas inspecciones visuales y por corrientes de Foucault.

Para determinar la curva de evaluación de colmatado, se establece una relación entre el nivel real de colmatado

obtenido mediante la inspección visual de un paso y un indicador de colmatado de la señal de la sonda de corriente de Foucault correspondiente, por ejemplo, una distancia en una representación Lissajous como anteriormente. Las mediciones posteriores mediante corrientes de Foucault permiten ajustar la estimación del ritmo de colmatado estimando el nivel de colmatado comparando el indicador de colmatado determinado a partir de la señal de la sonda de corriente de Foucault con la curva de evaluación de colmatado.

El procedimiento propuesto por el documento EP 2 584 254 A2 se basa, por tanto, en la misma hipótesis que la del documento EP 2 474 826 A1, es decir, en la existencia de un modelo representativo de una relación sencilla entre la señal de medición y la tasa de colmatado. Ahora bien, la experiencia ha demostrado que éste no es el caso, y por consiguiente, los procedimientos propuestos no permiten una estimación correcta de la tasa de colmatado.

### Presentación de la invención

Un objetivo general de la invención es el de 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, proponiendo comparar un vector constituido por varios indicadores de colmatado con otros vectores constituidos por varios indicadores de colmatado.

En particular, se propone un procedimiento de evaluación del colmatado de pasos de una placa separadora de un intercambiador de calor de tubos, estando dichos pasos dispuestos a lo largo de los tubos para que un fluido atraviese la placa separadora, en el que, para cada uno de por lo menos un paso:

- se realiza, cerca del paso, por lo menos una medición de un parámetro que depende del colmatado o de la presencia de magnetita por medio de una sonda de corriente de Foucault,
- se deriva a partir de esta medición por lo menos un indicador de colmatado de dicho paso,

caracterizado porque se evalúa el colmatado comparando un conjunto de uno o varios vectores de indicadores de colmatado con dimensión por lo menos dos, construidos a partir de los indicadores de colmatado obtenidos de este modo, con una pluralidad de conjuntos de vectores de indicadores de colmatado contenidos en una base de datos, estando cada uno de dichos conjuntos de vectores de indicadores de colmatado de la base de datos asociado a un descriptor cuantitativo de colmatado.

Este procedimiento se completa, ventajosamente, por las siguientes características, consideradas de manera individual o en cualquiera de sus combinaciones técnicamente posibles:

- los conjuntos de vectores de indicadores de colmatado están representados por unas distribuciones de vectores de indicadores de colmatado de pasos de una porción de placa separadora y el descriptor cuantitativo asociado a cada distribución es una tasa de colmatado medio de los pasos de dicha porción de placa separadora, refiriéndose dicha base de datos a por lo menos N porciones de placas separadoras de diferentes intercambiadores de calor,  $N \geq 2$ , y comprendiendo N distribuciones de vectores de indicadores asociados cada uno a una tasa de colmatado medio de los pasos de dicha porción de placa separadora;
- las distribuciones de vectores de indicadores de colmatado están asociados a unas informaciones espaciales, de manera que se correspondan a unas imágenes representativas de la distribución espacial de los valores de colmatado;
- el procedimiento comprende las etapas según las cuales
  - se determina la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa inspeccionada,
  - se calcula una medida de similitud  $d_n$  entre la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada y cada una de las distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos,
  - se seleccionan las K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos cuyas medidas de similitud  $d_n$  con la distribución de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada son las mayores,
  - se determina el colmatado a partir de las tasas de colmatado asociadas a dichas K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados;
- la determinación del colmatado comprende una etapa según la cual:

- se calcula una media de las tasas de colmatado asociadas a dichas K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados, ponderándose cada tasa de colmatado con respecto a la medida de similitud entre la distribución de vectores de indicador  $P_n(\theta)$  de la base de datos a la que se asocia y la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada;
- el procedimiento comprende además una determinación de una evaluación de la incertidumbre con respecto al colmatado determinada de este modo, con respecto a la base de la medición de la similitud entre las K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados de este modo y la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada y/o de la variabilidad de los descriptores cuantitativos de colmatado asociados a las distribuciones de vectores de indicadores de porción de placa separadora seleccionada;
- calcular la medida de similitud  $d_n$  entre la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada y cada una de las distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos comprende una estimación de las distribuciones por medio de un modelo de ley de probabilidad  $\mathbb{P}$ , preferentemente una ley gaussiana, una modelización de Parzen o una media ponderada de leyes de probabilidad;
- un conjunto de indicadores de colmatado es un vector de indicadores de colmatado de un tubo y el descriptor cuantitativo asociado a dicho vector es una tasa de colmatado de dicho tubo, refiriéndose dicha base de datos a por lo menos M tubos de diferentes intercambiadores de calor,  $M \geq 2$ , comprendiendo dicha base de datos M vectores de indicadores del colmatado de un paso, asociados cada uno a una tasa de colmatado de dicho paso;
- el procedimiento comprende etapas según las cuales:
  - se determina el vector de indicadores  $\theta$  del tubo inspeccionado,
  - se calcula la distribución de colmatado *c a posteriori*  $p(c|\theta)$  para el vector de indicadores  $\theta$  del tubo inspeccionado a partir de los vectores de indicadores de la base de datos,
  - se determina el colmatado por la suma de la distribución de colmatado *a posteriori*  $p(c|\theta)$  ponderada con respecto al colmatado;
  - calcular la ley *a posteriori* comprende una estimación de la ley *a priori*  $p(c)$  y de la verosimilitud  $p(c|\theta)$ ;
  - la ley *a priori* se determina mediante una relación entre:
    - el número  $M_k$  de tubos de la base de datos que presentan una tasa de colmatado  $c$  comprendida en un intervalo  $[c_k; c_{k+1}]$ , y
    - el número total de tubos en la base de datos;
  - la ley de verosimilitud se aproxima a  $c$  comprendido en un intervalo  $[c_k; c_{k+1}]$  mediante una ley de probabilidad  $\mathbb{P}$ , preferentemente una ley gaussiana, una modelización de Parzen, o una media ponderada de leyes;
- los conjuntos de vectores de indicadores de colmatado de la base de datos son paquetes que presentan cada uno un centro o una media y que reagrupan, basándose en una medida de similitud que se refiere a los valores de dichos vectores de indicadores de colmatado, los vectores de indicadores de colmatado que están más próximos, en el sentido de la medida de similitud, a dicho centro o a dicha media, estando un descriptor cuantitativo de colmatado asociado a cada uno de dichos paquetes, y en el que, para un conjunto de uno o varios vectores de indicadores de colmatado del tubo o de la porción de placa inspeccionada:
  - se compara cada uno de los vectores de indicadores del conjunto de vectores de indicadores de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado con los centros o las medias respectivos de los paquetes de la base de datos mediante una medida de similitud,
  - se seleccionan m paquetes de vectores de indicadores de colmatado basándose en esta comparación,
  - se determina la tasa de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado a partir de los descriptores cuantitativos asociados a los m paquetes de vectores de indicadores seleccionados.

Preferentemente, la tasa de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado se determina a partir de una media de los descriptores cuantitativos de cada paquete ponderado a partir de las medidas de similitud calculadas.

5

La invención también se refiere a un producto de programa informático que comprende instrucciones de código de programa para la ejecución de las etapas del procedimiento según la invención cuando se ejecuta dicho programa en un ordenador.

10 **Presentación de las figuras**

Otras características, objetos y ventajas de la invención se desprenderán de la siguiente descripción, que es puramente ilustrativa y no limitativa, y que debe leerse junto con los dibujos adjuntos en los que:

15

- la figura 1, ya comentada, ilustra esquemáticamente, en una vista desde arriba, un paso foliculado en una placa separadora, por el que pasa un tubo, según una configuración habitual de un generador de vapor;

20

- la figura 2 ilustra esquemáticamente las etapas del procedimiento según una primera variante de la invención;

25

- la figura 3 ilustra esquemáticamente las etapas del procedimiento según una segunda variante de la invención.

25 **Descripción detallada**

25

El procedimiento comienza de manera conocida por el experto en la materia por la realización, en las proximidades de pasos, de por lo menos una medición de un parámetro que depende del colmatado o de la presencia de magnetita, normalmente por medio de una sonda de corriente de Foucault, cuya medición es representativa de las variaciones de impedancia que pueden provocar el colmatado, por ejemplo, mediante la magnetita.

30

A continuación de esta medición, se deriva por lo menos un indicador de colmatado de dicho paso. La siguiente descripción proporciona un ejemplo no limitativo de derivación de un indicador de colmatado de este tipo.

35

Tras la extracción a partir de la señal de medición de una señal correspondiente al paso del borde trasero de la placa separadora 10 por la sonda, y de una señal correspondiente al paso del borde delantero 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 correspondiente al paso del borde trasero de la placa separadora 10 por la sonda, y de una señal de borde superior correspondiente al paso del borde delantero de la placa separadora 10 por la sonda.

40

La sonda de corriente de Foucault adquiere, normalmente, por lo menos en parte la señal de medición en modo diferencial, y la señal de medición es una señal de frecuencias múltiples compuesta por lo menos por dos señales con frecuencias diferentes.

45

Preferentemente, solamente se utilizan las señales correspondientes al modo diferencial ( $z_1$  y  $z_3$ ) dado que son más sensibles al paso de la placa separadora 10. Estas señales se adquieren a frecuencias diferentes, y la señal de borde inferior se determina como combinación lineal de por lo menos dos señales a frecuencias diferentes de dicha señal de medición, en caso de que se produjera  $z_1$  y  $z_3$ .

50

Esta combinación lineal hace intervenir un coeficiente complejo  $\alpha$  optimizado para minimizar la potencia de señal a lo largo del tubo 11 más allá de las zonas de placa separadora 10.

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

55

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

siendo

60

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

para que los índices  $n$  correspondan a la señal más allá las zonas de placa separadora 10, y correspondiendo  $z_{3inf}$  a la respuesta de la sonda en modo diferencial en la frecuencia  $f_3$  durante el paso del borde trasero, es decir inferior, de la placa separadora 10 por la sonda, y correspondiendo  $z_{1inf}$  a la respuesta de la sonda en modo diferencial en la frecuencia  $f_1$  durante el paso del borde trasero, es decir inferior, de la placa separadora 10 por la

65

sonda.

Asimismo, se procede con la señal de borde superior, con preferentemente el mismo coeficiente  $\alpha$ , de manera que  $z_{sup}[n] = z_{3sup}[n] - \alpha \cdot z_{1sup}[n]$ , correspondiendo  $z_{3sup}$  a la respuesta de la sonda en modo diferencial en la frecuencia  $f_3$  durante el paso del borde delantero, es decir superior, de la placa separadora 10 por la sonda, y correspondiendo  $z_{1sup}$  a la respuesta de la sonda en modo diferencial en la frecuencia  $f_1$  durante el paso del borde delantero, es decir superior, de la placa separadora 10 por la sonda.

De este modo, se obtienen dos señales complejas. La señal de borde inferior  $z_{inf}$  se escribe:

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

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

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

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

Por tanto, queda poner en práctica un tratamiento adecuado de estas señales con el fin de evaluar el colmatado del paso de la placa separadora 10. Este tratamiento se pone en práctica en 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. Por tanto, es a partir de la señal de borde inferior por la que puede estimarse la tasa de colmatado.

Más en particular, se realiza la deconvolución de la señal de borde inferior mediante la respuesta de impulso compleja de la sonda.

De hecho, en un caso ideal de una sonda SAX perfecta la señal solamente debe contener una serie de impulsos complejos, correspondientes al paso por un borde de placa separadora 10, al encuentro con un depósito, y al estudio de la única señal de borde inferior debe 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 le denomina la respuesta de impulso de la sonda. Por tanto, es necesario restaurar la señal de borde inferior para encontrar la respuesta de la sonda representativa del estado de colmatado del paso foliculado en la placa separadora 10.

Para ello, se determina una estimación de la respuesta de impulso de la sonda, preferentemente correspondiente al paso de un borde adecuado 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 realizar la deconvolución de la señal de borde inferior  $z_{inf}[n]$  por una señal  $h[n]$  correspondiente a la respuesta de impulso de la sonda al paso de la placa separadora.

Para ello, puede utilizarse un filtro. Un filtro de este tipo se denomina filtro de deconvolución o incluso filtro de restauración. El filtro de deconvolución se calcula a partir de la estimación de la respuesta de impulso, y se pone en práctica una deconvolución de la señal de borde inferior por medio de dicho filtro de deconvolución. El filtro de deconvolución puede ser una aproximación de la inversa de la respuesta de impulso de la sonda. También puede ser un filtro de Wiener y la deconvolución ser de este modo una deconvolución de Wiener, lo que constituye un modo de realización preferido del procedimiento descrito. Pueden utilizarse otros métodos de deconvolución existentes.

Por ejemplo, puede buscarse la señal de borde inferior sometida a deconvolución  $z_{inf,id}[n]$  que es la que mejor se corresponde con la señal de borde inferior  $z_{inf}[n]$  que se ha observado:

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

siendo  $J_1$  el criterio de adecuación con los datos (por ejemplo una norma  $L_2$ , una norma  $L_2$  al cuadrado, una norma  $L_1, \dots$ ) y  $J_2$  un criterio que se traduce en una característica conocida *a priori* con respecto a la señal que busca reconstruirse (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  $\lambda$  permite otorgar más o menos importancia a la idea inicial con respecto a la solución ( $J_2$ ) con respecto a la adecuación a los datos ( $J_1$ ). Este criterio también puede escribirse en el campo de frecuencias.

Por tanto, existen varias variantes de criterios de deconvolución  $J_1$  y  $J_2$  que pueden utilizarse, y, para cada variante, varios métodos de resoluciones, por ejemplo, mediante filtrado o mediante métodos de optimización.

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

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

10 designando el exponente \* la conjugación compleja,  $H[f]$  la transformada de Fourier de la respuesta de impulso de la sonda,  $S[f]$  la densidad espectral de potencia de la señal que va a estimarse y  $B[f]$  la densidad espectral de potencia del ruido. Un relleno de ceros o "zero-padding", es decir una adición de ceros en el interior de las señales, puede realizarse durante el cálculo de las transformadas de Fourier discretas con el fin de aumentar la resolución de frecuencias.

15 La respuesta de impulso  $h[n]$  de la sonda puede estimarse a partir de la respuesta de la sonda al paso del borde delantero de la placa separadora 10 por la sonda, es decir por medio de la señal de borde superior, según la fórmula:

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

20 Por ejemplo, a partir de los tratamientos realizados para extraer las partes útiles de la señal de medición, se conocen los índices  $i_{inf}$  e  $i_{sup}$  de la señal de medición correspondientes a los pasos de los bordes inferior y superior, respectivamente, de la placa separadora 10. Para una frecuencia de muestreo  $F_e = 1000$  Hz, una velocidad de la sonda  $v = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y una longitud de placa separadora 10 de 30 mm, se obtienen 60 muestras de señal correspondientes a la placa separadora 10, y una respuesta de impulso de 20 muestras aproximadamente. Entonces, puede elegirse 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  $0,53(i_{inf} + i_{sup})$ , o bien un margen de 20 muestras de cada lado de la respuesta de impulso. Obviamente, estas cifras se indican como ejemplo no limitativo de la utilización de la señal de borde superior  $z_{sup}[n]$  para la estimación de la respuesta de impulso de la sonda.

30 Son posibles varios enfoques para estimar la relación ruido con respecto a señal correspondiente a la relación de la densidad espectral de potencia del ruido  $B[f]$  y la densidad espectral de potencia  $S[f]$  de la señal que va a estimarse. Uno de estos enfoques consiste en aproximar esta relación mediante una constante. En efecto, la señal que va a estimarse corresponde a una señal de borde inferior ideal que presentaría una serie de impulsos correspondientes a las variaciones de impedancia compleja encontradas por la sonda en las proximidades del borde inferior de la placa separadora 10. Por consiguiente, la densidad espectral de potencia  $S[f]$  de esta señal puede considerarse como una constante. La densidad espectral de potencia del ruido  $B[f]$  puede determinarse en las partes de la señal entre las placas separadoras 10. Esto puede asimilarse a un ruido blanco, y por tanto esta densidad espectral de potencia del ruido  $B[f]$  puede considerarse como una constante. De este modo, la relación de las densidades espectrales de potencia del ruido y de la señal que va a estimarse puede considerarse como una constante. Esta constante puede regularse de manera empírica, tomando por ejemplo:

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

45 siendo  $\sigma^2$  la potencia del ruido, calculada en una zona más allá de las placas.

Una vez determinado el filtro de deconvolución, puede entonces procederse a la deconvolución de la señal de borde inferior por medio de 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 sometida a deconvolución compleja  $z_{inf id}$  introducida por la respuesta de impulso de la sonda:

$$z_{inf id} = z_{inf} * g$$

55 En la práctica, esta operación puede realizarse en el campo de frecuencias:

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

siendo  $z_{inf}[f]$  la transformada de Fourier de la señal de borde inferior  $z_{inf}$ ,  $G[f]$  la transformada de Fourier del filtro

de deconvolución  $g$ , y  $TF^{-1}$  indicando la transformación de Fourier inversa.

Con el fin de evitar amplificar demasiado sustancialmente determinadas frecuencias que solamente corresponden al ruido de medición, se aplica un filtrado mediante un filtro de paso bajo a la señal de borde inferior sometida a deconvolución, determinándose la frecuencia de corte de dicho filtro de paso bajo por medio de una desviación estándar de una función gaussiana que constituye una aproximación de la parte real de un impulso de la señal de borde inferior correspondiente al paso de borde de placa separadora 10.

En efecto, la parte real o imaginaria de un impulso de la señal de borde inferior correspondiente al paso de borde de placa separadora 10 presenta formas muy similares a funciones gaussianas o de sus derivadas. Por ejemplo, puede asimilarse a una función gaussiana el impulso 0 en la parte real de la señal de borde inferior correspondiente al paso del borde inferior de la placa separadora 10 en una configuración sin colmatado, y a una combinación lineal de derivadas de la función gaussiana, correspondiendo los impulsos en la parte imaginaria de la señal de borde inferior al paso del borde inferior de la placa separadora 10 en una configuración colmatada.

Si  $\sigma$  es la desviación estándar de esta función gaussiana, generalmente del orden de 3 o 4 muestras, las transformadas de Fourier de las señales que van a someterse a deconvolución no contienen más energía más allá de una frecuencia máxima  $f_{m\acute{a}x}$ :

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{3}{2\pi\sigma}$$

Por tanto, puede elegirse esta frecuencia máxima  $f_{m\acute{a}x}$  como frecuencia de corte del filtro de paso bajo.

Una vez filtrada de este modo la señal de borde inferior sometida a deconvolución, solamente queda analizar la misma para evaluar el colmatado. Según el proceso descrito anteriormente, durante el que se ha realizado, en las proximidades de cada uno de los pasos, por lo menos una medición de un parámetro que depende del colmatado o de la presencia de magnetita, se disponen entonces indicadores de colmatado de dicho paso que se derivan de esta medición.

Pueden utilizarse diversos tipos de indicadores. Por ejemplo, si se denomina  $y_+$  (resp  $y_-$ ) a los valores positivos (resp. negativos) recogidos por la parte imaginaria de la señal obtenida en las proximidades del borde inferior de la placa tras la deconvolución, y si se definen las diferentes magnitudes a continuación:

- $E_{Y_+} / E_{Y_-}$ : 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 recogidos por  $y_+$  y por  $y_-$ .

También pueden tomarse los valores mínimos y máximos de las siguientes magnitudes, por ejemplo para cada par de magnitudes físicas,  $X_{Y_+} / X_{Y_-}$ , correspondiendo X a E, P, M o  $\Gamma$ , puede definirse un indicador mínimo y un indicador máximo:

- $X_{m\acute{i}n} = \text{mín} \{X_{Y_+}, X_{Y_-}\}$
- $X_{m\acute{a}x} = \text{máx} \{X_{Y_+}, X_{Y_-}\}$ .

A continuación, se evalúa el colmatado comparando un conjunto de uno o varios vectores de indicadores de colmatado, con dimensión por lo menos dos, contruidos a partir de los indicadores obtenidos de este modo, con una pluralidad de conjuntos de vectores de indicadores de colmatado contenidos en una base de datos, asociándose cada uno de dichos conjuntos a un descriptor cuantitativo de colmatado. Un vector de indicadores de colmatado es preferentemente con dimensión por lo menos dos, es decir que, preferentemente, no es un vector escalar.

Cada vector de indicadores es con dimensión por lo menos dos, lo que significa que comprende por lo menos dos indicadores como componentes. Por ejemplo, puede construirse un vector de indicadores que comprende como componentes:

- la energía  $E_{Y_+}$  de los valores positivos recogidos por la parte imaginaria de la señal obtenida en las proximidades del borde inferior de la placa tras la deconvolución, y
- la energía  $E_{Y_-}$  de los valores negativos recogidos por la parte imaginaria de la señal obtenida en las proximidades del borde inferior de la placa tras la deconvolución.

El vector de indicadores se escribe entonces  $(E_{Y_+}; E_{Y_-})$ . Pueden utilizarse otros vectores de indicadores, combinando dos o más indicadores.

Los indicadores de colmatado contenidos en una base de datos son, normalmente, tasas de colmatado procedentes de inspección televisiva (ETV). El diseño de los generadores de vapores permite, en efecto, la inspección de su placa separadora superior por medio de una cámara robotizada. En cada imagen, se observa uno de los foliculos de la intersección tubo/placa. La tasa de colmatado del paso foliculado observado se evalúa midiendo la reducción de sección a nivel del borde inferior. Teniendo en cuenta que el fenómeno de obstrucción es homogéneo en cada uno de los foliculos de la intersección tubo/placa, se obtiene la tasa de colmatado del paso de esta última.

Este método permite, al contrario del examen por sonda de corriente de Foucault, disponer de una indicación cuantitativa de la tasa de colmatado de la placa, lo que constituye un descriptor cuantitativo del colmatado. Sin embargo, solamente puede aplicarse a la placa separadora superior, con la excepción de determinados tipos de generadores de vapor que también permiten el paso de aparatos de fotografía en algunos tubos de la placa intermedia. Por tanto, la ETV no permite obtener el perfil del colmatado en el conjunto del generador de vapor. Por otro lado, en una placa inspeccionada, los tubos periféricos siguen siendo inaccesibles.

Sin embargo, estos exámenes televisivos se realizan con una fecha anterior, y los resultados se almacenan en bases de datos, de manera que existe una gran cantidad de datos que pueden aprovecharse, para deducir la evaluación cuantitativa del colmatado combinando las evaluaciones cuantitativas de los exámenes televisivos pasados con una inspección de los tubos por corriente de Foucault.

Ha de observarse que las etapas de los siguientes procedimientos se ponen en práctica por lo menos por un ordenador, una unidad central o de cálculo, un circuito electrónico analógico, un circuito electrónico numérico, un microprocesador, y/o medios informáticos.

#### Estimación en el conjunto de una porción de placa

En una primera variante del procedimiento, en este caso pretende estimarse directamente la tasa de colmatado medio por porción de placa separadora, sin pasar por una evaluación del colmatado de cada uno de sus tubos.

Los conjuntos de indicadores de colmatado de la base de datos se representan, por tanto, mediante distribuciones de vectores de indicadores de colmatado de pasos de una porción de placa separadora y el descriptor cuantitativo asociado a cada distribución es una tasa de colmatado medio de los pasos de dicha porción de placa separadora, refiriéndose dicha base de datos a por lo menos N porciones de placas separadoras de diferentes intercambiadores de calor,  $N \geq 2$ , y comprendiendo N distribuciones de vectores de indicadores asociados cada uno a una tasa de colmatado medio de los pasos de dicha porción de placa separadora.

En el siguiente ejemplo, las porciones de placa separadora son semiplacas separadoras, correspondientes a la parte de las placas separadoras presentes en el tramo frío o caliente del intercambiador de calor, en este caso un generador de vapor. Por tanto, se supone que se disponen N semiplacas para las que se conoce la tasa de colmatado deducida del examen televisivo  $C_n$  y los valores de los vectores de indicadores  $\theta$  para cada uno de sus tubos.

#### *Enfoque por medida de similitud entre distribución de vectores de indicadores*

Un primer enfoque se basa en las medidas de similitud entre distribuciones de vectores de indicadores. El principio de este enfoque es reconocer en la base de datos a disposición las distribuciones de vectores de indicadores que se parecen más a la de la semiplaca que pretende evaluarse. Se considera  $P_{prueba}(\theta)$ , la distribución de vectores de indicadores de la semiplaca inspeccionada, y  $P_n(\theta)$  ( $n \in \llbracket 1, N \rrbracket$ ) las distribuciones de vectores de indicadores de las N semiplacas disponibles en la base de datos.

De este modo, tras haber determinado la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa inspeccionada (etapa S20), se calcula una medida de similitud  $d_n$  entre la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada y cada una de las distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos (etapa S21).

La medida de similitud entre distribuciones puede evaluarse, por ejemplo, por medio de una función distancia que se observará como D. De este modo, se calcula la distancia  $d_n$  entre la distribución de vectores de indicadores de la placa que va a evaluarse  $P_{prueba}(\theta)$  y cada una de las distribuciones  $P_n(\theta)$  de la base de datos:

$$d_n = D(P_{prueba}, P_n)$$

Existen varias medidas de similitud que pueden utilizarse. En particular, puede utilizarse, por ejemplo, la divergencia de Kullback-Leibler, la distancia de Bhattacharyya o incluso la distancia de Hellinger. Esta última

ofrece, en particular, la ventaja de proporcionar un resultado limitado entre 0 y 1, resultando de este modo interpretable en términos absolutos. Su fórmula se proporciona mediante la siguiente ecuación:

$$D_H(P, Q) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_i (\sqrt{p_i} - \sqrt{q_i})^2}$$

5 siendo p y q los vectores de indicadores de las distribuciones de vectores de indicadores P y Q, respectivamente.

Puede entonces seleccionarse (etapa S22), de las N distancias calculadas de este modo, correspondiendo por tanto los K más pequeños ( $K \in \llbracket 1, N \rrbracket$ ), a las distribuciones más similares. Por tanto, se seleccionan las K distribuciones de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos cuyas medidas de similitud con la distribución de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada son las mayores. Cuando la medida de similitud es una distancia, esto implica por tanto tomar las K distribuciones más pequeñas.

15 A continuación, se determina el colmatado (etapa S23) a partir de las tasas de colmatado asociadas a dichas K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados.

Es posible calcular una media de las tasas de colmatado asociadas a dichas K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados, ponderándose cada tasa de colmatado con respecto a la medida de similitud entre la distribución de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos a la que se asocia y la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada.

Se pondera entonces la media de las colmataciones de estas K semiplacas mediante sus distancias respectivas a la distribución de vectores de indicadores de la semiplaca que va a evaluarse, con el fin de proporcionar más peso a las más similares:

$$\hat{c}_{prueba} = \frac{\sum_{k=1}^K d_k^{-1} c_k}{\sum_{k=1}^K d_k^{-1}}$$

El cálculo de la medida de similitud  $d_n$  entre la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada y cada una de las distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos puede comprender una estimación de las distribuciones por medio de un modelo de ley de probabilidad  $\mathbb{P}$ , preferentemente una ley gaussiana, una modelización de Parzen o una media ponderada de leyes de probabilidad.

En efecto, medir las distancias entre distribuciones requiere, no obstante, estimar estas últimas. Pueden aproximarse entonces mediante un modelo de ley de probabilidad  $\mathbb{P}$ , función de parámetros  $\omega$  que va a determinarse, construida tras las observaciones en las que se dispone:

$$P(\theta) \approx \mathbb{P}(\theta, \omega)$$

40 La cuestión de la elección de  $\mathbb{P}$  está abierta: esta puede basarse, por ejemplo, en una ley gaussiana multidimensional:

$$P(\theta) \approx N(\theta, \mu, \Sigma)$$

45 en la que  $\mu$  representa el vector de indicadores medio de la semiplaca, y  $\Sigma$  su matriz de varianza-covarianza (constituyendo estos dos elementos los parámetros de la distribución que van a calcularse).

También puede optarse por una modelización de Parzen. Su principio es el de colocar una función núcleo, por ejemplo, una función gaussiana en cada una de las observaciones de la población estadística en la que pretende estimarse la densidad de probabilidad. La suma de todas estas funciones gaussianas proporciona la verosimilitud de Parzen.

En el caso considerado, las observaciones son los vectores de indicadores extraídos de cada uno de los tubos. La distribución de los vectores de indicadores de la semiplaca n que comprende  $M_n$  tubos de vectores de indicadores  $\theta_m$  ( $m \in \llbracket 1, M_n \rrbracket$ ) con una dimensión d se proporciona entonces mediante:

$$P_n(\theta) = \frac{1}{\sqrt{|\Sigma_n|} (2\pi)^{\frac{d}{2}} h^d} \sum_{m=1}^{M_n} \exp\left(-\frac{1}{2h^2} (\theta - \theta_m)^T \Sigma_n^{-1} (\theta - \theta_m)\right)$$

El parámetro h representa la varianza de la función gaussiana (es decir su anchura) que va a aplicarse en cada una de las observaciones. Habitualmente, se utiliza el mismo valor en cada una de las observaciones. Puede tomarse, por ejemplo, h = 0,5. La matriz de varianza-covarianza  $\Sigma_n$  se calcula con respecto al conjunto de los vectores de indicadores que pertenecen a la semiplaca n. Puede aproximarse su matriz inversa por la matriz formada a partir de sus únicos coeficientes diagonales inversos, según

$$\Sigma_n^{-1} = (\sigma_{i,j})^{-1} \approx \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{1,1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{d,d}} \end{pmatrix}$$

siendo  $i, j \in \llbracket 1, d \rrbracket$ .

Por otro lado, la medida de similitud entre distribuciones permite introducir una puntuación de incertidumbre del resultado: distancias reducidas entre una semiplaca que va a evaluarse y determinadas semiplacas de la base de datos auguran una gran similitud con los ejemplos de colmatado ya observados, y, por tanto, una confianza elevada en el resultado. Al contrario, una semiplaca atípica, que se diferencia de la historia a disposición, verá su distribución de vectores de indicadores alejada de todas las otras, lo que se traduce en una incertidumbre más importante en el resultado de la estimación.

El procedimiento puede comprender de este modo una determinación de una evaluación de la incertidumbre con respecto al colmatado determinada de este modo, basándose en la medición de la similitud entre las K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados de este modo y la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada, y/o de la variabilidad de los descriptores cuantitativos asociados a las distribuciones de vectores de indicadores de porción de placa separadora, es decir las semiplacas.

*Enfoque por cuantificación vectorial*

Otro enfoque se basa en la cuantificación vectorial. El principio de la cuantificación vectorial es dividir un gran número de datos (vectores de un espacio proporcionado) entre un número limitado de paquetes (o “agrupación” según la terminología en inglés) en el sentido de una medida de similitud (generalmente una distancia). De este modo, se separa el espacio de los vectores de indicadores  $\theta$  en K paquetes, siendo K un parámetro del algoritmo determinado de antemano, comprendiendo cada uno un centro o una media. Cada vector de indicadores  $\theta$  pertenece a la agrupación cuyo centro o media es el más próximo.

De este modo, los conjuntos de vectores de indicadores de colmatado de la base de datos son entonces paquetes que presentan cada uno un centro o una media, y que reagrupan, basándose en una medida de similitud que se refiere a los vectores de indicadores de colmatado, los vectores de indicadores de colmatado que están más próximos a dicho centro o a dicha media, en el sentido de la medida de similitud, estando un descriptor cuantitativo de colmatado asociado a cada uno de dichos paquetes, y en el que, para un conjunto de uno o varios vectores de indicadores de colmatado del tubo o de la porción de placa inspeccionada:

- se compara cada uno de los vectores de indicadores del conjunto de vectores de indicadores de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado con los centros o medias respectivos de los paquetes de la base de datos,
- se seleccionan m paquetes de vectores de indicadores de colmatado basándose en esta comparación,
- se determina la tasa de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado a partir de los descriptores cuantitativos asociados a los m paquetes de vectores de indicadores seleccionados.

La división del espacio de los indicadores puede obtenerse de diversas maneras. Puede fijarse de manera aleatoria *a priori*, o utilizar un algoritmo que proporciona los paquetes, o agrupaciones, desprendiéndose de la manera más natural del conjunto de los vectores de indicadores de la base de datos (tal como el algoritmo denominado “K-means”). Una vez realizada esta división, se determina para la semiplaca que va a

inspeccionarse el número de tubos que la componen y que pertenecen a cada división del espacio de los vectores de indicadores. Se da lugar a un vector  $r = (r_1, \dots, r_k)$  en el que la componente  $r_k$  corresponde a la proporción de tubos de la semiplaca que pertenece a la agrupación  $k$  (por tanto, se proporciona  $\sum_k r_k = 1$ ).

5 Se realiza entonces la estimación directamente en estos vectores  $r$ , buscando por ejemplo las  $N$  semiplacas de la base de datos cuyos vectores  $r_n$  ( $n \in \{1, \dots, N\}$ ) son los más próximos al vector de la semiplaca que va a estimarse en el sentido de una medida de similitud proporcionada, normalmente una distancia. Finalmente, puede calcularse el colmatado medio mediante la media de las colmataciones  $c_n$  de las semiplacas seleccionadas ponderadas mediante las distancias  $d_n$  calculadas:

$$c = \frac{\sum_{n=1}^N d_n^{-1} c_n}{\sum_{n=1}^N d_n^{-1}}$$

15 Ha de observarse que las distribuciones de vectores de indicadores de colmatado pueden asociarse a información espacial, tal como la posición de los tubos en la placa separadora, con el fin de corresponderse con imágenes representativas de la distribución espacial de los valores de colmatado. En este caso, el colmatado se estima por medio de un procedimiento de reconocimiento de imágenes, que puede retomar los principios señalados anteriormente, con el fin de estimar el colmatado reconociendo, en la base de datos, la o las imágenes más próximas a las obtenidas para el intercambiador de calor inspeccionado.

20 Estimación tubos a tubos

Según otra variante, un conjunto de vectores de indicadores de colmatado es un vector de indicadores de colmatado de un tubo y el descriptor cuantitativo asociado a dicho vector es una tasa de colmatado de dicho tubo, refiriéndose dicha base de datos a por lo menos  $M$  tubos de diferentes intercambiadores de calor,  $M \geq 2$ , comprendiendo dicha base de datos  $M$  vectores de indicadores del colmatado de un paso, asociados cada uno a una tasa de colmatado de dicho paso de dicho tubo.

30 En el siguiente ejemplo, y como anteriormente, las porciones de placa separadora son semiplacas separadoras, correspondientes a la parte de las placas separadoras presentes en el tramo frío o caliente del intercambiador de calor, en este caso un generador de vapor. Para una intersección tubo/placa proporcionada, se observa en  $c$  la tasa de colmatado obtenida, por ejemplo, mediante examen televisivo, y  $\theta$  el vector de los indicadores cualitativos calculados anteriormente, tras haber determinado el vector de indicadores  $\theta$  del tubo inspeccionado. Se dispone, por tanto, de  $M$  pares  $\{\theta, c\}$  en la base de datos.

35 *Enfoque probabilista*

Según este enfoque, tras haber determinado el vector de indicadores del tubo (S30), se calcula la distribución de tasa de colmatado  $c$  a posteriori  $p(c|\theta)$  para el vector de indicadores  $\theta$ , a partir de los vectores de la base de datos (etapa S31), y se determina el colmatado mediante la suma de la distribución de colmatado a posteriori ponderada con respecto a las tasas de colmatado (etapa S32).

En efecto, este enfoque denominado de mínimos cuadrados a posteriori consiste en minimizar el error cuadrático medio de estimación definido por

$$|\hat{\epsilon}| = \sum_c (c_{est} - c)^2 p(c|\theta)$$

45 en el que  $p(c|\theta)$  designa la distribución del colmatado  $c$  del vector de indicadores  $\theta$  (es la ley a posteriori). El estimador  $c_{est}$  del colmatado que minimiza la ecuación anterior se proporciona por la ecuación:

$$c_{est} = \sum_c c p(c|\theta)$$

La ley a posteriori puede proporcionarse mediante el teorema de Bayes:

$$p(c|\theta) \propto p(\theta|c) p(c)$$

55 en el que  $p(c)$  designa la ley a priori y  $p(\theta|c)$  la verosimilitud de los indicadores en la teoría bayesiana. El cálculo de la ley a posteriori puede comprender de este modo una estimación de la ley a priori  $p(c)$  y de la verosimilitud  $p(\theta|c)$ .

Para explicar estas dos probabilidades, puede someterse a muestreo el intervalo de las tasas de colmatado posibles (del 0 al 100 %) en varias ventanas consecutivas  $C_k = [c_k; c_{k+1}]$  y calcular  $p(c)$  y  $p(\theta|c)$  en cada una de las mismas. De este modo, la ley *a priori* se obtiene según una relación entre:

- el número  $M_k$  de tubos de la base de datos que presentan una tasa de colmatado  $c$  comprendida en un intervalo  $[c_k; c_{k+1}]$ , y
- el número total de tubos en la base de datos:

$$p(c \in C_k) = \frac{N_k}{\text{Tarjeta}(\text{base de datos})}$$

en la que  $N_k$  representa el número de tubos de la base de datos que presentan un colmatado  $c$  comprendida en el intervalo  $C_k$ , y  $\text{Tarjeta}(\text{base de datos})$  el número total de tubos en la base de datos.

La ley de verosimilitud se aproxima a  $c$  comprendida en un intervalo  $[c_k; c_{k+1}]$  por una ley de probabilidad  $\mathbb{P}$ , preferentemente una ley gaussiana, una modelización de Parzen, o una media ponderado de leyes, función de parámetros  $\omega$  que va a determinarse, al igual que lo que se ha señalado anteriormente:

$$p((\theta)|c) \approx \mathbb{P}(\theta, \omega)$$

Por ejemplo, en el marco de una modelización de Parzen:

$$p(\theta|c \in C_k) = \frac{1}{\sqrt{|\Sigma_k|} (2\pi)^{\frac{d}{2}} h^d} \sum_{j=1}^{N_k} \exp\left(-\frac{1}{2h^2} (\theta - \theta_j)^T \Sigma_k^{-1} (\theta - \theta_j)\right)$$

Como en el caso de la estimación por semiplaca, conviene fijar el valor  $h$  de la anchura de las funciones gaussianas (por ejemplo en este caso incluso  $h = 0,5$ ). Para hacer frente a los problemas de acondicionamiento eventuales de la matriz de varianza-covarianza de los vectores de indicadores de los tubos que pertenecen a la clase  $C_k$ ,  $\Sigma_k$ , en este caso puede aproximarse también su matriz inversa mediante la matriz formada a partir de sus únicos coeficientes diagonales inversos según

$$\Sigma_k^{-1} = (\sigma_{i,j})^{-1} \approx \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{1,1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{d,d}} \end{pmatrix}$$

siendo  $i, j \in \llbracket 1, d \rrbracket$

Este cálculo de la verosimilitud permite reescribir la ecuación de la ley *a posteriori* y obtener la expresión de la ley de probabilidad *a posteriori* en el intervalo  $C_k$ :

$$p(c \in C_k | \theta) = \frac{p(\theta|c \in C_k) p(c \in C_k)}{\sum_i p(\theta|c \in C_i) p(c \in C_i)} = \frac{\mathbb{P}(\theta, \omega_k) p(c \in C_k)}{\sum_i \mathbb{P}(\theta, \omega_i) p(c \in C_i)}$$

La estimación  $c_{est}$  del colmatado (etapa S33) para el vector de indicadores  $\theta$  del tubo inspeccionado se deduce de la ecuación anterior:

$$c_{est} = \sum_c c p(c|\theta)$$

y se proporciona por

$$c_{est} = \sum_c \langle c_i \rangle p(c \in C_i | \theta)$$

en la que  $\langle c_i \rangle$  simboliza el colmatado medio de los tubos que pertenecen al intervalo  $C_i$ .

5 *Enfoque por cuantificación vectorial*

El empleo de técnicas de cuantificación vectorial tiene por objeto evaluar la tasa de colmatado de un tubo según la posición de su vector de indicadores  $\theta$  en el espacio de los vectores de indicadores, con respecto a los ejemplos de vectores que constituyen la base de datos. Esquemáticamente, el principio es el de proporcionar al tubo inspeccionado cuya colmatado va a evaluarse una tasa de colmatado similar a la de los tubos de la base que son próximos a su vector de indicadores  $\theta$ .

15 Como anteriormente, los conjuntos de vectores de indicadores de colmatado de la base de datos son paquetes que presentan cada uno un centro o una media y que reagrupan, basándose en una medida de similitud que se porta en los valores de dichos indicadores de colmatado, los indicadores de colmatado cuyos valores son los más próximos a dicho centro o a dicha media, estando un descriptor cuantitativo de colmatado asociado a cada uno de dichos paquetes.

20 Más en particular, se divide de este modo el conjunto de los vectores de indicadores de la base de datos en  $K$  conjuntos, con por ejemplo el algoritmo conocido como "K-means". Una vez realizada esta etapa, se compara cada uno de los vectores de indicadores del conjunto de indicadores de colmatado con los centros o medias respectivos de los paquetes de la base de datos, por medio de una medida de similitud, por ejemplo calculando las distancias  $d_k$  del vector de indicadores  $\theta$  del tubo inspeccionado en cada uno de los centros de los agrupaciones ( $k \in \llbracket 1, K \rrbracket$ ). Pueden utilizarse varios tipos de distancias, la distancia euclidiana habitual en las medidas de similitud que tiene en cuenta la distribución de los datos. De estos últimos, se mencionará la distancia de Mahalanobis, que hace intervenir la matriz de varianza-covarianza  $\Sigma_k$  de la división  $k$  y su centro  $\mu_k$ . La distancia de Mahalanobis entre un vector de indicadores  $\theta$  y el conjunto de los datos de la agrupación  $k$  se escribe entonces:

$$30 \quad d_k = \sqrt{(\theta - \mu_k)^T \Sigma_k^{-1} (\theta - \mu_k)}$$

Queda entonces estimar el valor de la tasa de colmatado del tubo según estas distancias calculadas. Una solución es la de proceder a una media de las colmataciones medias  $\langle c_k \rangle$  de cada paquete ponderado a partir de las medidas de similitud, por ejemplo, la inversa de las distancias tales como las distancias  $d_k$  calculadas anteriormente:

$$c_{est} = \frac{\sum_{k=1}^K d_k^{-1} \langle c_k \rangle}{\sum_{k=1}^K d_k^{-1}}$$

40 Ha de observarse que la media puede calcularse con respecto a la base de las tasas de colmataciones de la totalidad de los paquetes, o con respecto a una selección de  $m$  de entre los mismos con respecto a la base de una comparación en el sentido de una medida de similitud, como anteriormente. Por tanto, se considera que la selección de los  $m$  paquetes puede comprender todos los paquetes, los paquetes más próximos, o todos los paquetes con la excepción de determinados paquetes que se excluyen por motivos de anomalías.

45 Se observará que, de manera contraria al enfoque probabilista, esta variante de estimación por cuantificación vectorial no se realiza *a priori* en el conjunto de datos a disposición. En efecto, la ley de probabilidad *a priori* del colmatado,  $p(c)$ , no interviene en este caso en ningún momento. Ahora bien, esta última puede resultar considerablemente sesgada si determinados intervalos de valores de colmatado se sobrerrepresentan (o subrepresentan). Este procedimiento resulta de este modo menos dependiente de la representatividad de la base de datos.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de evaluación del colmatado de pasos de una placa separadora (10) de un intercambiador de calor 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, para por lo menos un paso (12a, 12b):

- se realiza, cerca del paso, por lo menos una medición de un parámetro que depende del colmatado o de la presencia de magnetita por medio de una sonda de corriente de Foucault,
- se deriva de esta medición por lo menos un indicador de colmatado de dicho paso,

caracterizado por que se evalúa el colmatado comparando un conjunto de uno o varios vectores de indicadores de colmatado con dimensión por lo menos dos, construidos a partir de los indicadores de colmatado así obtenidos con una pluralidad de conjuntos de vectores de indicadores de colmatado contenidos en una base de datos, estando cada uno de dichos conjuntos de vectores de indicadores asociado a un descriptor cuantitativo de colmatado.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los conjuntos de vectores de indicadores de colmatado están representados por unas distribuciones de vectores de indicadores de colmatado de pasos de una porción de placa separadora y el descriptor cuantitativo asociado a cada distribución es una tasa de colmatado medio de los pasos de dicha porción de placa separadora, refiriéndose dicha base de datos a por lo menos N porciones de placas separadoras de diferentes intercambiadores de calor,  $N \geq 2$ , y comprendiendo N distribuciones de vectores de indicadores asociados cada uno a una tasa de colmatado medio de los pasos de dicha porción de placa separadora.

3. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que:

- se determina la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa inspeccionada,
- se calcula una medida de similitud  $d_n$  entre la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada y cada una de las distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos,
- se seleccionan las K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos cuyas medidas de similitud  $d_n$  con la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada son las mayores,
- se determina el colmatado a partir de las tasas de colmatado asociadas a dichas K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la determinación del colmatado comprende una etapa según la cual:

- se calcula una media de las tasas de colmatado asociadas a dichas K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados, ponderándose cada tasa de colmatado por la medida de similitud entre la distribución de vectores de indicador  $P_n(\theta)$  de la base de datos a la que está asociado y la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 3 a 4, que comprende además una determinación de una evaluación de la incertidumbre con respecto al colmatado así determinado, en base a la medida de la similitud entre las K distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos seleccionados de este modo y la distribución vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada, y/o de la variabilidad de los descriptores cuantitativos asociados a las distribuciones de vectores de indicadores de porción de placa separadora seleccionados.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 3 a 5, en el que el cálculo de la medida de similitud  $d_n$  entre la distribución de vectores de indicadores  $P_{prueba}(\theta)$  de la porción de placa separadora inspeccionada y cada una de las distribuciones de vectores de indicadores  $P_n(\theta)$  de la base de datos comprende una estimación de las

distribuciones por medio de un modelo de ley de probabilidad  $\mathbb{P}^p$ , preferentemente una ley gaussiana, una modelización de Parzen o una media ponderada de leyes de probabilidad.

7. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que las distribuciones de vectores de indicadores de colmatado están asociadas a unas informaciones espaciales, de manera que correspondan a unas imágenes representativas de la distribución espacial de los valores de colmatado.

8. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que un conjunto de vectores de indicadores de colmatado es un vector de indicadores de colmatado de un tubo y el descriptor cuantitativo asociado a dicho vector es una tasa de colmatado de dicho tubo, refiriéndose dicha base de datos a por lo menos M tubos de diferentes generadores de vapor,  $M \geq 2$ , comprendiendo dicha base de datos M vectores de indicadores del colmatado de un paso, asociados cada uno a una tasa de colmatado de dicho paso.
9. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que:
- se determina el vector de indicadores  $\theta$  del tubo inspeccionado,
  - se calcula la distribución de tasa de colmatado *a posteriori*  $p(c|\theta)$  para el vector de indicadores  $\theta$ , a partir de los vectores de indicadores de la base de datos,
  - se determina el colmatado mediante la suma de la distribución de colmatado *a posteriori*  $p(c|\theta)$  ponderada por las tasas de colmatado  $c$ .
10. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que el cálculo de la ley *a posteriori* comprende una estimación de la ley *a priori*  $p(c)$  y de la verosimilitud  $p(c|\theta)$ .
11. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que la ley *a priori* está determinada por una relación entre:
- el número  $M_k$  de tubos de la base de datos que presentan una tasa de colmatado  $c$  comprendida en un intervalo  $[c_k; C_{k+1}]$ , y
  - el número total de tubos en la base de datos.
12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 9 a 10, en el que la ley de verosimilitud se aproxima a  $c$  comprendido en un intervalo  $[c_k; c_{k+1}]$  mediante una ley de probabilidad  $\mathbb{P}$ , preferentemente una ley gaussiana, una modelización de Parzen o una media ponderada de leyes.
13. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los conjuntos de vectores de indicadores de colmatado de la base de datos son unos paquetes de vectores de indicadores que presentan cada uno un centro o una media y que reagrupan, en base a una medida de similitud que se refiere a dichos vectores de indicadores de colmatado, los vectores de indicadores de colmatado que son los más próximos, en el sentido de la medida de similitud, a dicho centro o a dicha media, estando un descriptor cuantitativo de colmatado asociado a cada uno de dichos paquetes, y en el que, para un conjunto de uno o varios vectores de indicadores de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado:
- se compara cada uno de los vectores de indicadores del conjunto de los vectores de indicadores de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado con los centros o medias respectivos de los paquetes de la base de datos mediante una medida de similitud,
  - se seleccionan  $m$  paquetes de vectores de indicadores de colmatado en base a esta comparación,
  - se determina la tasa de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado a partir de los descriptores cuantitativos asociados a los  $m$  paquetes de vectores de indicadores seleccionados.
14. Procedimiento según la reivindicación 13, en el que la tasa de colmatado del tubo o porción de placa inspeccionado se determina a partir de una media de los descriptores cuantitativos de cada paquete ponderada a partir de las medidas de similitud calculadas.
15. Producto de programa informático que comprende unas instrucciones de código de programa para la ejecución de las etapas del procedimiento según las reivindicaciones anteriores cuando se ejecuta dicho programa en un ordenador.

FIG 1

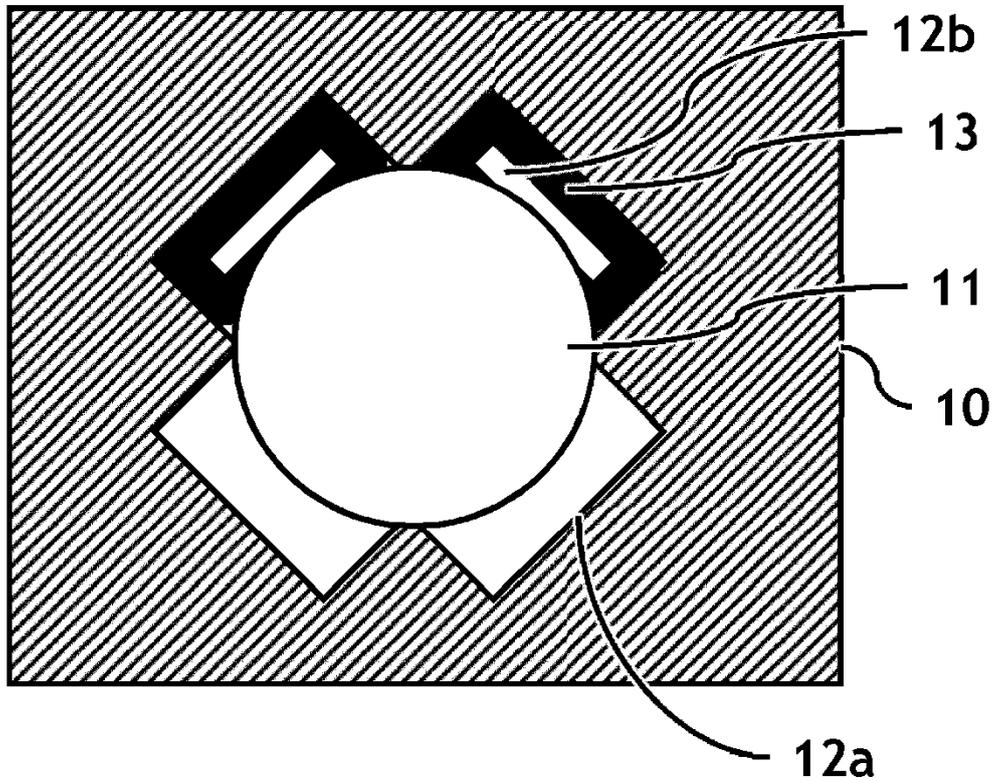
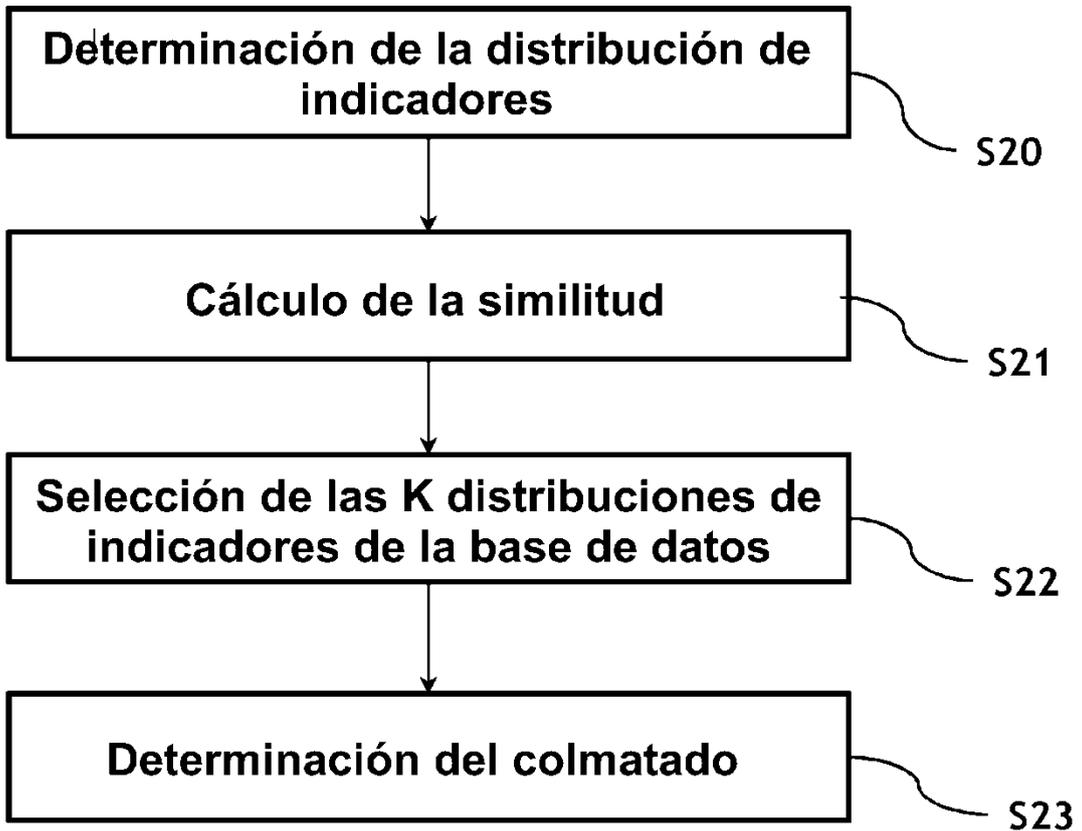


FIG 2



**FIG 3**

