

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 689 104**

51 Int. Cl.:

G01N 17/00 (2006.01)

G01N 27/22 (2006.01)

G01N 27/24 (2006.01)

G06T 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.02.2013 PCT/FI2013/050113**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.08.2014 WO14118425**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.02.2013 E 13873954 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.06.2018 EP 2951567**

54 Título: **Método y aparato para determinar la localización de una interfaz de interés, y programa informático**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.11.2018

73 Titular/es:
**ROCSOLE LTD. (100.0%)
Kauppakatu 20
70100 Kuopio, FI**

72 Inventor/es:
**VOUTILAINEN, ARTO;
LAAKKONEN, PASI y
LEHIKONEN, ANSSI**

74 Agente/Representante:
ISERN JARA, Jorge

ES 2 689 104 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

Método y aparato para determinar la localización de una interfaz de interés, y programa informático

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere, en general, a la monitorización de procesos industriales en los que líquidos, o más en general cualquier material fluido, fluyen por tuberías, recipientes o contenedores, o se almacenan en los mismos. En particular, la presente invención se refiere a soluciones para monitorizar la formación de incrustaciones en las superficies de tuberías, recipientes y contenedores, y/o el desgaste de las mismas.

Antecedentes de la invención

15 La contaminación o la denominada formación de incrustaciones es un problema bien conocido, que puede producirse en muchas aplicaciones diferentes en la industria de procesos. La formación de incrustaciones, a menudo llamada también bioincrustación, generalmente implica la deposición o acumulación de material no deseado sobre la superficie de tuberías, recipientes u otros contenedores utilizados para dirigir o almacenar materiales fluidos.

20 Como resultado de la incrustación, se forma una capa adicional de material sólido sobre dicha superficie. De este modo, se modifica el volumen libre dentro de la tubería u otro contenedor, disponible para la presencia de un material fluido. Esto puede conllevar muchos problemas. Por ejemplo, la forma modificada del volumen libre causa perturbaciones en el flujo de fluido. Como poco, el área de sección transversal reducida del volumen interior libre de una tubería de proceso aumenta la resistencia al flujo a través de la tubería. En casos extremos la tubería puede quedar completamente obstruida, deteniendo así todo el proceso en cuestión. En general, la formación de incrustaciones es un problema común en diversas áreas de la industria de procesos, que ocasiona costos operacionales y pérdidas de producción significativamente mayores.

30 El material formado sobre las superficies de los equipos de proceso debido a la formación de incrustaciones deberá eliminarse periódicamente. Esto puede resultar muy engorroso. En particular, cuando el material extra se forma por el enlace de hidrocarburos, habitualmente resulta muy duro y extremadamente difícil eliminarlo mediante procesos mecánicos. Como alternativa a la limpieza mecánica se han desarrollado diferentes agentes de ablandamiento y liberación, para diversos materiales formados por incrustación. En lugar de eliminar el material de incrustación tras la formación del mismo, a menudo resulta más preferible actuar de forma proactiva evitando la incrustación. Por ejemplo, pueden usarse diferentes productos químicos como inhibidores de la formación de incrustaciones, mezclados con el material fluido, para monitorizar la formación de incrustaciones inorgánicas duras. El uso de tales sustancias químicas reduce la tasa de formación de incrustaciones y modifica la estructura de las mismas, de modo que sean más fáciles de eliminar. En cualquier caso, para evitar problemas graves, p. ej. debido a la obstrucción inesperada de una tubería de proceso, o para optimizar el uso de inhibidores de la formación de incrustaciones, sería necesario poder monitorizar el estado de formación de incrustaciones y su desarrollo a medida que pasa el tiempo.

45 Por otro lado, un problema adicional que se produce en diversos equipos de procesos industriales para dirigir y/o almacenar materiales fluidos es el desgaste de las paredes de las tuberías y los recipientes. El desgaste puede producirse debido a materiales químicamente agresivos que reaccionan con las superficies del equipo de proceso, pero también puede ser el resultado de una simple abrasión mecánica, causada p. ej. por arena contenida en un flujo de líquido. De forma similar a la formación de incrustaciones, el desgaste también modifica los volúmenes y las condiciones de flujo dentro del equipo de proceso y, por lo tanto, puede afectar adversamente los procesos. En casos extremos, el desgaste de una pared de una tubería o un recipiente, y la consecuente descarga repentina del material fluido al exterior del equipo de proceso, puede ocasionar accidentes graves y grandes repercusiones financieras, e incluso lesiones a personas. De forma similar a la formación de incrustaciones, también debería poder monitorizarse el desgaste de forma continua.

55 El desgaste también puede producirse simultáneamente a la formación de incrustaciones. Por lo tanto, sería muy útil contar con una solución eficiente capaz de monitorizar en línea ambos fenómenos.

60 En la técnica anterior, la formación de incrustaciones y/o el desgaste de las paredes de tuberías se ha monitorizado o diagnosticado p. ej. mediante técnicas con cámara, en las que se instala una cámara en el equipo de proceso a analizar, mediante métodos acústicos (habitualmente ultrasonidos), o mediante métodos mecánicos sencillos en los que se montan en las paredes de la tubería objetos de prueba inteligentes especiales. Por ejemplo, el documento EP 2115452 da a conocer como ejemplo específico un aparato y un método para medir la formación de incrustaciones dentro de una membrana enrollada en espiral, mediante la transmisión de una señal acústica al interior de un tubo, la medición de la señal reflejada desde una interfaz de material contenido dentro del tubo, y la comparación del resultado de medición con una señal de referencia de un tubo limpio conocido.

65 Las técnicas de ultrasonido y de objetos de prueba son prácticamente mediciones puntuales, lo que limita severamente la aplicabilidad de las técnicas. En las técnicas con cámara a menudo resulta necesario interrumpir el

proceso, para llevar a cabo las etapas de monitorización en sí. En el artículo "Shape Deformation in Two-Dimensional Electrical Impedance Tomography", de A Boyle et al, IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, volumen 31, n.º 12, 1 de diciembre de 2012, una tomografía de impedancia eléctrica (TIE) utiliza mediciones de electrodos de superficie para reconstruir una imagen de la conductividad del medio contenido. Se demuestra que pueden reconstruirse el movimiento de algunos electrodos y las distorsiones de los límites en función de los cambios de conductividad, al tiempo que se reducen los artefactos de la imagen en el proceso.

En "Reconstruction of domain boundary and conductivity in electrical impedance tomography using the approximation error approach", de A Nissinen et al, International Journal for Uncertainty Quantification, volumen 1, n.º 3, 1 de enero de 2011, se presenta un enfoque de error de aproximación al modelado de los errores inducidos por la forma de límite desconocido y la reconstrucción aproximada de forma de límite.

Por el momento, no existe una técnica fiable de monitorización en línea para detectar incrustaciones y desgaste en una etapa temprana. En particular, no existe una solución comercial eficiente disponible que pueda usarse para monitorizar ambos fenómenos dañinos.

Sumario de la invención

El propósito de la presente invención es proporcionar un método mejorado, así como un aparato mejorado, para determinar la formación de incrustaciones y/o el desgaste en procesos industriales. Otro propósito de la presente invención es proporcionar un producto de programa informático novedoso para llevar a cabo dicho método.

La presente invención se caracteriza por lo que se presenta en las reivindicaciones 1, 8 y 15.

La presente invención se centra en un método para determinar la ubicación de una interfaz de interés, que se encuentra en un dominio objetivo, entre un volumen libre de un material fluido y un material sólido que limita dicho volumen libre. El proceso industrial en el que ha de localizarse la interfaz de interés puede ser cualquier tipo de proceso en el que puedan estar presentes la formación de incrustaciones y/o el desgaste. Este tipo de procesos se dan, p. ej., en la producción y refinación de petróleo, otras industrias basadas en el petróleo, y en la producción de energía, sin limitarse a estos ejemplos.

Por "material fluido" en el presente documento se entiende cualquier material que pueda fluir por una tubería de proceso, o por un recipiente o contenedor. Tal material puede estar en forma líquida, pero también puede contener una o más sustancias más o menos sólidas o gaseosas.

Ejemplos de materiales que forman incrustaciones en la industria petrolera son el betún y el asfalteno, y diversos materiales de incrustación incluidos en el término común "incrustaciones minerales". Estos últimos comprenden, p. ej., compuestos a base de carbonato cálcico y sulfato cálcico, comprendiendo estos últimos, p. ej., yeso. En la producción de energía las incrustaciones pueden producirse, p. ej., debido a la deposición de contaminantes contenidos en el agua sobre las superficies de las calderas. Algunos contaminantes del agua que pueden formar depósitos en las calderas incluyen, p. ej., calcio, magnesio, hierro, aluminio y sílice. Las incrustaciones habitualmente se forman como sales de estos materiales.

En el caso de incrustaciones formadas en el dominio objetivo, el material sólido que limita el volumen libre, y, por lo tanto, define y limita la interfaz de interés, puede ser el material de las incrustaciones. Se analizan a continuación otras situaciones.

El método de la presente invención comprende las siguientes etapas.

En primer lugar, el método comprende proporcionar un modelo matemático del dominio objetivo que determine, para una pluralidad de pares de grupos de electrodos, estando dispuestos los electrodos de los grupos de electrodos en conexión de medición de capacitancia con el dominio objetivo y soportados por un cuerpo de soporte sólido que tiene una superficie límite en el dominio objetivo, una cantidad eléctrica característica proporcional a la capacitancia de un condensador formado por un par de grupos de electrodos.

El dominio objetivo anteriormente mencionado quiere decir un área o volumen de dos o tres dimensiones a considerar en el método.

En general, el modelo matemático quiere decir una representación numérica de las relaciones entre las propiedades materiales físicas del dominio objetivo de dos o tres dimensiones, y la cantidad eléctrica característica. Así, el propósito general del modelo matemático es proporcionar estimaciones de los valores de la cantidad eléctrica característica, cuyos valores están determinados por las propiedades materiales en el dominio objetivo.

La cantidad eléctrica característica puede ser cualquier cantidad eléctrica que sea proporcional o dependiente de la capacidad de un condensador, formado por un par de grupos de electrodos. La conexión de medición de capacitancia entre los electrodos y el dominio objetivo quiere decir que los electrodos están tan conectados al

dominio objetivo que pueden llevarse a cabo mediciones de capacitancia, o al menos mediciones de alguna cantidad eléctrica característica proporcional a la capacitancia de capacitores formados por pares de grupos de electrodos. Para implementar esto, por ejemplo, no debería haber ningún cuerpo conductor eléctricamente continuo que forme una protección equipotencial entre los electrodos y el dominio objetivo.

5 Estar soportado por el cuerpo de soporte quiere decir que los electrodos pueden montarse sobre cualquier superficie del cuerpo de soporte, o que pueden estar parcialmente o completamente incrustados dentro del mismo de modo que, a ser posible, no estén en contacto directo con el exterior del cuerpo de soporte. La selección de la configuración más apropiada depende, por ejemplo, del material del cuerpo de soporte, que puede estar formado por un material eléctricamente aislante o conductor. En el primer caso, los electrodos pueden estar incrustados dentro del cuerpo de soporte. En caso de que el material del cuerpo de soporte sea eléctricamente conductor, los electrodos deberían estar situados sobre una superficie del cuerpo de soporte.

15 En el presente documento, la superficie límite quiere decir una superficie del cuerpo de soporte que define una interfaz entre el cuerpo de soporte y el exterior del mismo. Estar ubicada "en" el dominio objetivo quiere decir que la superficie límite pertenece al dominio objetivo bidimensional o tridimensional. En otras palabras, esta definición abarca tanto las situaciones en las que la superficie límite se encuentra dentro del dominio objetivo bidimensional o tridimensional, y situaciones en las que la superficie límite coincide con el límite del dominio objetivo, definiendo así el límite del dominio objetivo.

20 En el presente documento, un "grupo de electrodos" quiere decir uno o más de los electrodos. Así, un condensador a observar mediante el método puede estar formado entre un par de dos electrodos únicamente, pero también pueden reemplazarse uno o ambos de dichos electrodos individuales por un grupo de al menos dos electrodos separados.

25 La capacitancia, o alguna otra cantidad eléctrica dependiente de la capacitancia como la cantidad eléctrica característica a medir, se basa en el hecho de que los materiales de incrustación habitualmente son materiales eléctricamente aislantes, también en aquellos casos en los que el material fluido pueda ser eléctricamente conductor.

30 La cantidad eléctrica primaria que afecta a la capacitancia es naturalmente la permisividad eléctrica en el dominio objetivo. En otras palabras, la capacitancia, y por lo tanto cualquier cantidad eléctrica proporcional a la capacitancia de un condensador formado entre y por un par de grupos de electrodos, depende de la permitividad del uno o más materiales dentro del dominio objetivo. Por el contrario, en la práctica, el modelo matemático preferiblemente determina también la permitividad en el dominio objetivo. Esto puede determinarse como solo un valor representativo, pero más preferiblemente como la distribución de la permitividad en el área o volumen del dominio objetivo.

35 El método también comprende recibir mediciones de la cantidad eléctrica característica para una pluralidad de pares de grupos de electrodos. En el presente documento, "recibir" quiere decir que el método de la presente invención en sí mismo no comprende necesariamente llevar a cabo las mediciones reales, sino que tales mediciones, es decir los resultados medidos, pueden llevarse a cabo por separado y simplemente se reciben como una etapa del método. Esto permite, por ejemplo, una realización en la que los resultados de las mediciones efectuadas en un sitio de medición se envían electrónicamente a un sitio de análisis donde se llevan a cabo el análisis y la interfaz de determinación de interés reales. Por otro lado, también es posible por supuesto efectuar las mediciones y el análisis integralmente, p. ej. utilizando un único sistema de análisis que comprenda también los electrodos y el equipo de medición apropiado como medios informáticos para efectuar los cálculos reales.

40 Las mediciones pueden llevarse a cabo de acuerdo con los principios que son bien conocidos en el campo de las mediciones eléctricas, en particular en el campo de las mediciones de capacitancia eléctrica. En lo sucesivo se analizan detalles y ejemplos adicionales de posibles cantidades eléctricas características determinadas por el modelo matemático, y medidas por medio de los pares de grupos de electrodos, en la sección de descripción detallada de la presente memoria.

45 Después de haber recibido el número deseado de valores de cantidad eléctrica medida, se ajusta el modelo matemático para reducir las diferencias entre los valores de cantidad eléctrica característicos medidos y los determinados por el modelo matemático. Esto implica comparar los valores de cantidad eléctrica medidos y los correspondientes valores simulados, determinados por el modelo matemático, y cambiar los parámetros del modelo matemático para que los valores simulados se acerquen a los valores medidos reales, de modo que la cantidad eléctrica primaria, p. ej. la permitividad, tenga las propiedades deseadas.

50 Cuando se logra una coherencia suficiente entre los valores de cantidad eléctrica medidos y simulados, se usa como base el modelo ajustado, que representa el dominio objetivo real, para determinar la ubicación de la interfaz de interés.

65

Por ejemplo, cuando el modelo determina la distribución de la permitividad en el dominio objetivo, el modelo ajustado proporciona una reconstrucción de la distribución de la permitividad verdadera en el dominio objetivo, y la determinación de la ubicación de la interfaz de interés puede hacerse basándose en dicha distribución de la permitividad, determinada por el modelo ajustado. Ésta es una realización preferida de la presente invención. Los cambios abruptos en la permitividad reconstruida pueden considerarse como indicaciones de la presencia de una interfaz entre dos materiales, p. ej. el material fluido en el volumen libre y el material de incrustación sólido depositado sobre la superficie límite. Cuando la superficie límite se encuentra dentro del interior del dominio objetivo, tal cambio de permitividad también puede indicar también la ubicación de la superficie límite del propio cuerpo de soporte. Por otro lado, en el caso en el que la superficie límite coincida con el límite del dominio objetivo, la inexistencia de cualquier oportunidad clara de permitividad puede interpretarse como que no se ha formado ningún material de incrustación sobre la superficie límite. Así, para resumir, en el método de la presente invención, la interfaz de interés también puede ser la superficie de un material de incrustación sólido como la superficie límite del cuerpo de soporte sólido.

El enlace entre las superficies reales del equipo de proceso de interés y la superficie límite es que el cuerpo de soporte, y la superficie límite del mismo, se consideran simulando la situación real de formación de incrustaciones y/o desgaste de esas superficies reales. Para una buena correlación entre el material de incrustación situado sobre la superficie límite y/o el desgaste de la misma, naturalmente resulta preferible que el cuerpo de soporte esté formado del mismo material que el equipo de proceso real. Por ejemplo, en caso de monitorizar la formación de incrustaciones en una tubería de proceso formada de un metal particular, preferiblemente el cuerpo de soporte estará formado también de exactamente la misma composición de metal. Por otro lado, en el caso de un cuerpo de soporte eléctricamente conductor, es necesario que los electrodos estén en contacto directo con el dominio objetivo. Así, también los electrodos se forman entonces preferiblemente del mismo material eléctricamente conductor que la tubería y el cuerpo de soporte, de manera que la incrustación se forme sobre los electrodos y/o el desgaste se produzca en los mismos, de manera similar a la tubería de proceso y al cuerpo de soporte exterior a los electrodos.

En la práctica, la comparación entre los valores de cantidad eléctrica característica medidos y los simulados correspondientes, y el cambio de los parámetros del modelo matemático, se conoce generalmente como un problema inverso o cálculo inverso. La resolución de un problema de inversión se basa en algoritmos computacionales habitualmente bastante complejos, que se llevan a cabo de forma al menos parcialmente automática por medio de programas de cálculo adecuados, instalados en un procesador adecuado. En la técnica se conocen diversos algoritmos diferentes que resultan adecuados para la presente invención. Algunos de ellos se analizan con más detalle en la sección de descripción detallada de la presente memoria.

En general, el proceso anterior para proporcionar un modelo del dominio objetivo, efectuar mediciones relacionadas con la capacitancia, y ajustar el modelo matemático para reducir las diferencias entre los valores de cantidad eléctrica simulados y medidos, puede denominarse ECT (tomografía de capacitancia eléctrica). Como un campo específico dentro de la tomografía eléctrica más general, los principios, la implementación del nivel práctico y las diferentes variaciones de la ECT son bien conocidos en la técnica. En la técnica anterior, un ejemplo común de uso de ECT es la generación de imágenes de un flujo multifásico, en donde se genera una imagen que muestra las áreas o volúmenes de diferentes fases dentro de un flujo de material. En el documento US 7496450 B2 se analiza un ejemplo de este tipo de método, y de los diferentes problemas prácticos asociados al mismo.

Así, a nivel general, la idea básica de la presente invención se refiere al uso de ECT para monitorizar la incrustación y/o el desgaste en equipos de procesos industriales en los que haya presente un material fluido. Sin embargo, el método de la presente invención no es necesariamente una verdadera tomografía ya que no se genera necesariamente una imagen completa que muestre la distribución de la cantidad eléctrica de interés en el dominio objetivo. En algunos casos, la interfaz de interés puede determinarse sobre la base del modelo matemático ajustado, que solo comprenda en el mismo, en lugar de una distribución de cantidad eléctrica completa en todo el dominio objetivo, alguna representación simplificada del dominio objetivo y la interfaz de interés.

Una característica muy ventajosa de la presente invención es que la anterior etapa de ajuste del modelo matemático comprende variar la ubicación de la superficie límite, para tener en cuenta, en la etapa de determinación de la ubicación de la interfaz de interés, el posible desgaste de la superficie límite.

Esta característica se basa en una observación de los inventores de que, en un proceso ECT o de tipo ECT aplicado a la investigación de la presencia de un posible depósito de incrustaciones sobre la superficie límite, las estimaciones de la cantidad eléctrica primaria son muy sensibles a las imprecisiones de la geometría de la superficie límite. En otras palabras, los inventores han descubierto que las leves incorrecciones en el modelado geométrico de la superficie límite puede conllevar grandes errores en la distribución de la permitividad estimada. En la práctica, esto puede observarse en la determinación errónea de presencia de material de incrustación sobre la superficie límite en una situación en la que, en lugar de cualquier incrustación, la ubicación de superficie límite real haya sido modificada como resultado del desgaste de la misma. Adicionalmente, los inventores han descubierto que los efectos del modelado geométrico incorrecto y la influencia de la distribución de la permitividad subyacente pueden estar separados entre sí, en cierta medida, lo que quiere decir que pueden estimarse los posibles cambios en la superficie límite debidos al desgaste, junto con la distribución de la permitividad. Por lo tanto, el dominio objetivo

deberá definirse con alta precisión. Independientemente de esto, pueden producirse errores insignificantes si la ubicación de la superficie límite ha cambiado con respecto a la ubicación inicial. En la práctica, esto puede observarse en la determinación errónea de la presencia de un espesor de material de incrustación sobre la superficie límite en una situación en la que, en lugar de estar presente material de incrustación alguno, la ubicación real de la superficie límite ha cambiado como resultado del desgaste de la misma.

El principio de dicha variación de la superficie límite es que, además de la parametrización real relacionada con los valores de cantidad eléctrica, también se varía la ubicación y/o geometría de la superficie límite para encontrar el modelo matemático que mejor se ajuste a los resultados medidos. En otras palabras, se modifican simultáneamente tanto la parametrización de la forma de la superficie límite como los parámetros que determinan los valores de cantidad eléctrica característica. Esto reduce de manera eficiente la posibilidad de situaciones de error descritas anteriormente, y permite detectar el cambio de la ubicación de la superficie límite como resultado del desgaste. Por otro lado, dicha detección de la ubicación de la superficie límite real permite usar el método también para aplicaciones en las que el interés primario no sea la formación de incrustaciones sino el desgaste de la superficie límite, siendo la presencia de depósitos de incrustación posiblemente un objeto secundario de interés o sin interés en absoluto.

En el caso en que la superficie límite queda realmente dentro del interior del dominio objetivo, dicha variación de la ubicación de la superficie límite comprende variar la geometría de la porción del cuerpo de soporte dentro del dominio objetivo. En el caso en que la superficie límite limita el dominio objetivo, dicha variación comprende variar toda la geometría del dominio objetivo.

Como sabrán los expertos en el campo de la tomografía eléctrica, un modelo matemático utilizado como una aproximación numérica del dominio objetivo deberá dividirse en píxeles (en caso de que sea bidimensional) o en vóxeles (en caso de que sea tridimensional), cada uno representando las propiedades físicas del dominio objetivo en esa ubicación particular. Cuanto más densa sea esta discretización, más detallada será la reconstrucción del dominio objetivo que puede generarse, pero, por otro lado, se necesitará más potencia computacional para resolver el problema de inversión.

En una realización preferida de la presente invención, para optimizar la precisión de la determinación de la interfaz de ubicación de interés, y, por lo tanto, la situación de incrustación y/o el desgaste de la superficie límite, se usa una discretización con densidad variable, aumentando la densidad hacia la superficie límite. Esto puede implementarse, p. ej., seleccionando una discretización densa dentro de una distancia particular con respecto a la superficie límite, y otra discretización menos refinada en otra parte. También puede haber varias zonas diferentes, cada una con una discretización dispuesta de manera diferente. La densidad de la discretización también puede variar continuamente en el dominio objetivo.

La geometría del cuerpo de soporte que soporta los electrodos para las mediciones de la cantidad eléctrica característica puede variar, dependiendo de la aplicación en cuestión. En una realización, el cuerpo de soporte comprende un cuerpo tubular, siendo la superficie límite la superficie interior del cuerpo tubular. En esta realización, el cuerpo de soporte puede ensamblarse como una parte de una tubería de proceso.

A modo de otro ejemplo de una geometría y configuración adecuadas, el cuerpo de soporte puede comprender una barra, siendo la superficie límite la superficie de la barra. A modo de otro posible ejemplo, el cuerpo de soporte puede comprender un cuerpo de tipo placa, siendo la superficie límite una de las dos superficies principales del cuerpo de tipo placa. Por superficie principal de un cuerpo de tipo placa se entiende un cuerpo que tenga dos superficies sustancialmente opuestas, es decir superficies principales, separadas entre sí por una distancia, y una (por ejemplo en el caso de una placa circular) o más superficies laterales que conecten con las superficies principales, definiendo las superficies principales y las superficies laterales el límite del cuerpo tridimensional. Estas geometrías permiten una colocación muy flexible del cuerpo de soporte y de los electrodos en el equipo de proceso. En una realización particular adecuada para monitorizar procesos cilíndricos simétricos, los electrodos pueden disponerse como una serie de electrodos en forma de anillo que rodeen el brazo de la barra. Con este tipo de electrodos un problema de inversión tridimensional podrá resolverse en dos direcciones solamente: la dirección axial a lo largo del eje de la barra, y la dirección radial. Esto simplifica los cálculos de un sistema tridimensional.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la superficie límite puede limitar el dominio objetivo, es decir definir el límite del mismo. Este enfoque resulta particularmente útil en los casos en que el cuerpo de soporte está formado por un material eléctricamente conductor, p. ej. un metal. Un cuerpo de soporte metálico puede utilizarse a altas temperaturas y presiones, lo que permite utilizar las mediciones de ECT en diversas condiciones ambientales adversas. Alternativamente, la superficie límite puede estar dentro del interior del dominio objetivo, de manera que el dominio objetivo se extienda detrás de la superficie límite. En este caso, al menos parte del cuerpo de soporte está incluida en el dominio objetivo. Esta disposición resulta adecuada para el uso de un cuerpo de soporte eléctricamente aislante.

El método anteriormente descrito se centra únicamente en las etapas de cálculo reales. Sin embargo, también está dentro del alcance de la presente invención llevar a cabo un método que comprenda proporcionar una pluralidad de

electrodos dispuestos en conexión de medición de capacitancia con el dominio objetivo, estando los electrodos soportados por un cuerpo de soporte sólido que tiene una superficie límite en el dominio objetivo, y medir la cantidad eléctrica característica para una pluralidad de pares de grupos de electrodos.

5 De acuerdo con un aspecto del dispositivo, los principios de la presente invención también pueden implementarse como un aparato para determinar la ubicación de una interfaz de interés, en un dominio objetivo, entre un volumen libre de un material fluido y un material sólido que limite dicho volumen libre, comprendiendo el aparato al menos una memoria y al menos un procesador, acoplado con la al menos una memoria; en donde la al menos una memoria comprende instrucciones de código de programa, que, al ser ejecutadas por el al menos un procesador, hacen que el aparato lleve a cabo las etapas descritas anteriormente en el contexto del aspecto del método.

10 La al menos una memoria y el al menos un procesador pueden implementarse, p. ej., en la forma de uno o más ordenadores en donde esté instalado un código de programa informático adecuado para llevar a cabo las etapas del método.

15 De forma similar al método, una característica muy ventajosa del aparato es que la etapa de ajuste del modelo matemático comprende variar la ubicación de la superficie límite para tener en cuenta, en el paso de determinación de la ubicación de la interfaz de interés, un posible desgaste de la superficie límite.

20 Todo lo que se ha afirmado anteriormente sobre las ventajas, detalles y características preferidas en el contexto del aspecto de método de la presente invención es también aplicable, mutatis mutandis, al aparato de acuerdo con la presente invención.

25 En lo anteriormente definido, el aparato de acuerdo con la presente invención comprende solo los medios computacionales. El aspecto de dispositivo de la presente invención también puede implementarse como un sistema de medición completo que comprenda también, además de dicho aparato, una pluralidad de electrodos dispuestos en conexión de medición de capacitancia con el dominio objetivo, estando los electrodos soportados por un cuerpo de soporte sólido que tenga una superficie límite en el dominio objetivo, y un aparato de medición configurado para llevar a cabo las mediciones de la cantidad eléctrica característica para una pluralidad de pares de grupos de electrodos.

30 Finalmente, los principios de la presente invención también pueden implementarse en la forma de un programa informático que comprenda un código de programa que, al ser ejecutado por un procesador, haga que el procesador efectúe el método definido y descrito anteriormente.

35 Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describe la presente invención con referencia a los dibujos adjuntos, en donde

40 La Figura 1 muestra una vista en sección transversal esquemática de un cuerpo de soporte eléctricamente aislante, con una disposición de electrodos;
 La Figura 2 muestra una vista en sección transversal esquemática de un cuerpo de soporte eléctricamente conductor, con una disposición de electrodos.
 45 La Figura 3 es una ilustración de un diagrama de flujo de un método para determinar la formación de incrustaciones en equipos de proceso y/o el desgaste de los mismos;
 La Figura 4 muestra un ejemplo de discretización de un dominio objetivo en un modelo matemático, que representa el dominio objetivo;
 La Figura 5 muestra una vista lateral esquemática de otro tipo de cuerpo de soporte, con una disposición de electrodos;
 50 La Figura 6 muestra otro tipo de cuerpo de soporte, con una disposición de electrodos; y
 La Figura 7 muestra un ejemplo de un sistema para determinar la formación de incrustaciones en equipos de proceso y/o el desgaste de los mismos.

55 Descripción detallada de las realizaciones

60 La Figura 1 muestra una ilustración esquemática en sección transversal de una tubería 1 eléctricamente aislante, que forma un cuerpo de soporte, sobre cuya superficie exterior están sujetos ocho electrodos 2 para efectuar mediciones de una o más cantidades eléctricas, dependientes de la capacidad en un dominio objetivo 3, que comprende el volumen interior 4 de la tubería 1 de proceso, así como la pared de la tubería. Así, en el ejemplo de la Figura 1, el límite del dominio objetivo 3 coincide con la superficie exterior de la tubería 1 y las superficies interiores de los electrodos 2 situados sobre la misma. Alternativamente, los electrodos podrían estar incrustados al menos parcialmente en la pared de la tubería.

65 La tubería 1 eléctricamente aislante está rodeada por una vaina metálica cilíndrica 5, que comprende unas pestañas 6 que se extienden radialmente desde la vaina hasta la superficie exterior de la tubería 1. Para llevar a cabo las mediciones, la vaina metálica y las pestañas de la misma están puestas a tierra (no se ilustra en el dibujo) y

5 sirven como una pantalla, para aislar el sistema de los electrodos y el dominio objetivo con respecto a su entorno y para evitar que los electrodos se "vean" directamente entre sí, a través del exterior de la tubería eléctricamente aislante. En ausencia de tales pestañas, el uno o más materiales situados entre la vaina metálica 5 y la superficie exterior de la tubería 1 también afectarían a las mediciones relacionadas con la capacitancia. En tal caso, el dominio objetivo deberá extenderse hasta el límite interior de la vaina metálica, para tener en cuenta este efecto en los cálculos.

10 El volumen interior 4 de la tubería 1 está lleno de un material de proceso, que fluye a través de la tubería. A partir de las sustancias incluidas en el material que fluye sobre la superficie interior 8 de la tubería se ha formado un material 7 de incrustación, en forma de depósito sólido, formando una superficie límite del volumen interior 4 de la tubería, modificando de este modo el volumen libre para el flujo del material. En caso de continuar, el proceso de formación de incrustaciones puede llegar a obstruir la tubería por completo, evitando así cualquier flujo a través de la misma.

15 A modo de otro cambio, en comparación con la situación inicial, el material de la tubería 1 eléctricamente aislante se ha erosionado en una ubicación de la superficie interior 8 de la tubería, de modo que se ha formado un pequeño rebaje 9 sobre la misma. El rebaje cambia además las condiciones de flujo dentro de la tubería 1. Adicionalmente a cambiar las condiciones de flujo, la erosión puede conllevar finalmente la rotura de la tubería como resultado del desgaste de la pared de la misma.

20 En la Figura 2 se muestra un ejemplo alternativo de una configuración de medición que permite determinar la incrustación y el desgaste en una tubería de proceso. A modo de diferencia fundamental en comparación con la Figura 1, está presente una tubería 11 de proceso eléctricamente conductora, formada p. ej. por algún tipo de metal. Desde el punto de vista de la medición de valores de una cantidad eléctrica dependiente de la capacitancia, en una tubería eléctricamente conductora es necesario que los electrodos 12 estén en contacto directo con el volumen interior 14 de la tubería. En este tipo de situación, el dominio objetivo 13 en el que se llevarán a cabo las mediciones está limitado por los electrodos y la superficie interior 18 de la tubería eléctricamente conductora. Adicionalmente, debido al material eléctricamente conductor de la tubería 11, cada electrodo está aislado eléctricamente con respecto a la tubería por medio de una delgada capa eléctricamente aislante, situada entre el electrodo y la pared de la tubería.

30 También en la situación de la Figura 2 está presente una incrustación 17, formada sobre la superficie interior 18 de la tubería, y un proceso de desgaste ha erosionado la superficie interior 18 de la tubería y uno de los electrodos, formando un ligero rebaje 19 sobre el mismo. Naturalmente, dicho rebaje también podría extenderse a áreas que afecten a más de un electrodo solamente.

35 En las Figuras 1 y 2, se han instalado en las tuberías ocho y diez electrodos, respectivamente. Sin embargo, estos son ejemplos solamente, que no limitan la aplicabilidad de la presente invención a ningún número de electrodos adecuadamente configurados para permitir la medición de capacitancias, u otras cantidades eléctricas dependientes de la capacidad, entre los electrodos. Adicionalmente, las Figuras 1 y 2 ilustran vistas en sección transversal de tuberías de proceso y un solo anillo de electrodo, refiriéndose así a un dominio objetivo bidimensional. Sin embargo, es posible medir y monitorizar un dominio objetivo tridimensional disponiendo electrodos en diversos anillos o capas, a lo largo de la dirección axial de la tubería de proceso.

40 En lo que sucesivo, se explica con referencia al diagrama de flujo de la Figura 3 la determinación de la incrustación y el desgaste dentro de un equipo de proceso, tal como las tuberías de las Figuras 1 y 2.

45 En primer lugar, a modo de etapa importante del método, se proporciona y almacena un modelo matemático del dominio objetivo, p. ej. en la memoria de un ordenador. El modelo matemático se construye de modo que comprenda información suficiente para determinar las capacitancias, o algunas otras cantidades eléctricas dependientes de la capacitancia, entre diferentes pares de electrodos o pares de grupos de electrodos. La información requerida para tal determinación puede comprender, p. ej., la distribución de permitividad dentro del dominio objetivo 3, 13. En la práctica, el modelo es una representación numérica del dominio objetivo físico, el modelo incluye suficiente información sobre las propiedades del material dentro del dominio objetivo, de manera que, sobre la base de esta información, puedan determinarse las estimaciones de los valores de cantidad eléctrica característica seleccionados a medir por los electrodos. El modelo numérico se divide en una pluralidad de nodos o celdas discretos, cada uno representativo de esa ubicación particular dentro del dominio objetivo. En la presente invención, la zona más interesante dentro del dominio objetivo es la zona adyacente a la superficie interior 8, 18 de la tubería de proceso, que forma una superficie límite del volumen interior libre 4, 14 de la tubería. Para permitir una determinación suficiente y precisa de la incrustación y/o el desgaste, el modelo se discretiza más densamente en las áreas cercanas a esta superficie límite y, para ahorrar energía computacional requerida, de manera menos refinada en el centro del volumen interior de la tubería. En la Figura 4 se ilustra un ejemplo de la geometría de un modelo 21, que corresponde a la disposición de la Figura 2 con diez electrodos, y la discretización del mismo.

60 Aunque el modelo proporciona una estimación del dominio objetivo real y de la cantidad (cantidades) física/s seleccionada/s que describen el uno o más materiales en el dominio objetivo, también se requiere información sobre

la situación real. Esto se lleva a cabo mediante la recepción, es decir la medición o recepción, de capacitancias fácilmente medibles entre grupos de los electrodos 2, 12. Por grupo de electrodos se entiende uno o más de los electrodos. Por ejemplo, la capacitancia puede medirse entre un primer grupo de solo un electrodo y otro grupo que comprenda, p. ej., dos, tres o más de los otros electrodos.

Las mediciones de capacitancia pueden efectuarse de acuerdo con los principios conocidos en la técnica. En general, en el campo de la ECT las mediciones se llevan a cabo habitualmente de la siguiente manera. Se aplica un suministro de voltaje (por ejemplo, de forma cuadrada, sinusoidal o triangular) a uno de los electrodos (un electrodo de excitación) mientras que los otros electrodos se ponen a tierra. Se miden las capacitancias entre todos los pares de electrodos (en este ejemplo, cada "grupo" de electrodos comprende un solo electrodo). Se repite la medición de capacitancia para poder usar cada uno de los electrodos como un electrodo de excitación. Por lo tanto, como regla general, si hay N electrodos en el sistema de medición, se obtienen $N(N-1)/2$ valores de capacitancia independientes. Las capacitancias dependen de la distribución de la permitividad en el dominio objetivo. La distribución de la permitividad del dominio objetivo puede estimarse entonces basándose en el conjunto de las mediciones de capacitancia. Basándose en la distribución de la permitividad, puede investigarse el comportamiento y/o ciertas cantidades físicas del proceso subyacente.

Aunque en el proceso ejemplar de la Figura 3 y en la descripción anterior la capacitancia se usa como la cantidad eléctrica a medir, es importante tener en cuenta que también puede seleccionarse cualquier otra cantidad eléctrica que sea proporcional a la capacitancia, es decir cualquier cantidad eléctrica dependiente de la capacidad, para su uso en las mediciones y en los cálculos.

Por ejemplo, medir una capacitancia generalmente implica suministrar una tensión para cargar el condensador, y medir la corriente cuando el condensador se descarga. En la práctica, la permitividad de un material es generalmente una cantidad valorada compleja, teniendo así una porción tanto real como imaginaria. Cuando se observa en condiciones de CA, una permitividad compleja de un material afecta tanto a la amplitud como a la fase de la corriente de descarga. Medir solo la amplitud proporciona información sobre la parte real de la permitividad solamente, mientras que la información de fase vincula la medición con la porción compleja de la permitividad. A modo de alternativa a la permitividad compleja, también podría hablarse de capacitancia compleja. Una cuestión interesante es que, si se tienen en cuenta tanto la información de fase como la de amplitud de las señales suministradas y medidas, también puede estimarse la distribución de conductividad eléctrica dentro del dominio objetivo. Cuando se va a medir la información de fase, preferiblemente se usa un voltaje de suministro sinusoidal.

Cuando se reciben las mediciones requeridas, se comparan las capacitancias u otros valores de cantidades eléctricas dependientes de la capacitancia, determinados por el modelo, con los resultados medidos, y se ajusta el modelo, es decir, sus parámetros, de manera que se reduzca la diferencia entre los valores modelados y medidos. El objetivo es encontrar una distribución de la permitividad dentro del dominio objetivo para el cual el resultado del modelo numérico se corresponda estrechamente con las mediciones. En esta comparación y ajuste pueden usarse principios y algoritmos conocidos en el campo de ECT, y matemáticas de inversión. Por ejemplo, cuando se genera una reconstrucción completa de la distribución de permitividad dentro del dominio objetivo, los algoritmos de reconstrucción de imágenes pueden ser generalmente algoritmos no iterativos o iterativos. Entre el primer grupo de algoritmos, un algoritmo rápido y sencillo es el algoritmo de retroproyección lineal (LBP). En el método de LBP, la relación entre la capacitancia y la distribución de la permitividad puede aproximarse de forma lineal normalizada, como:

$$B = S \cdot X \quad (1)$$

donde B es un vector de capacitancia normalizado, S es una matriz de sensibilidad del transductor (capacitancia normalizada con respecto a la permitividad normalizada), y X es un vector de permitividad normalizado. La tarea en el análisis es averiguar X, cuando se conoce B y S está predeterminado, según se desee.

Debe observarse que la permitividad de la pared de la tubería puede considerarse como un parámetro desconocido a estimar, pero usualmente su geometría y su valor de permitividad son al menos aproximadamente conocidos, y esta información puede usarse en la reconstrucción de la imagen.

Como característica esencial, en la etapa de ajuste del modelo matemático, se varía la ubicación de la superficie límite. El objetivo de esta variación es tener en cuenta el posible desgaste de la superficie límite, es decir la modificación de su ubicación. Así, el principio es parametrizar el límite de interés y estimar los parámetros límite simultáneamente a la distribución de la permitividad real. Este enfoque se basa en la observación por parte de los inventores de que tanto la geometría como la permitividad en el dominio objetivo afectan a las mediciones de ECT, y de que sus efectos son (al menos hasta cierto punto) ortogonales entre sí. La variación y la estimación de los parámetros de la forma del dominio objetivo y la distribución de la permitividad pueden basarse en un enfoque de inversión bayesiana, en el que se construye un modelo estadístico para los efectos debidos a las variaciones en la geometría. En lo sucesivo se analiza esto con más detalle.

En general, la etapa clave en la reconstrucción de imágenes ECT comprende construir un modelo numérico factible del sistema a inspeccionar. El modelo proporciona las relaciones entre la distribución de la permitividad y las capacitancias mutuas de la configuración de electrodos. Con la ayuda de este modelo, el objetivo es determinar una estimación de la distribución de la permitividad para que las capacitancias modeladas estén de acuerdo con las capacitancias medidas. En el enfoque de inversión bayesiana, la distribución de la permitividad y los datos observados se modelan como variables aleatorias, y el objetivo es determinar la función de densidad de probabilidad de la distribución de la permitividad, condicionada sobre las mediciones. Las mediciones generalmente no proporcionan información suficiente para que exista una solución única; por lo tanto, es necesario emplear densidades previas apropiadas para $\epsilon(x)$. En la determinación de la formación de incrustaciones y del desgaste, el objetivo es determinar la ubicación de la interfaz de interés, es decir el límite de la incrustación o la superficie límite del cuerpo de soporte, y por lo tanto resulta apropiado emplear modelos previos que preserven los bordes que existen en la distribución de permitividad real. Ejemplos de modelos previos no paramétricos de "preservación de bordes" son el modelo anterior de variación total y el modelo gaussiano anterior especialmente diseñado. Dependiendo de la aplicación y el objetivo a visualizar, puede resultar ventajoso usar modelos paramétricos para describir el objetivo. El modelo paramétrico se elige para que pueda describir cambios espaciales rápidos en la distribución de la permitividad.

Las propiedades estadísticas del ruido de medición afectan a la calidad de las imágenes reconstruidas, y, con el enfoque bayesiano, las estadísticas del ruido de medición pueden modelarse y tenerse en cuenta en los cálculos. El modelo numérico necesario en la formación de imágenes por ECT es una aproximación del comportamiento real del sistema de medición. Como mínimo, el modelo adolece de imprecisiones debido a la aproximación numérica del modelo matemático continuo gobernante. Adicionalmente, el modelado del sistema puede ser un reto porque no suele conocerse la geometría con exactitud, debido a las tolerancias mecánicas de la fabricación. Adicionalmente, los pequeños cambios en las condiciones de medición externas (que resultan, por ejemplo, en cambios de dimensión debido a la expansión térmica) pueden conllevar errores adicionales en las distribuciones de permitividad estimadas, ya que sus efectos no están directamente relacionados con el modelo utilizado. Los efectos de estos tipos de incertidumbre de modelado pueden compensarse, en cierta medida, utilizando un enfoque de error de aproximación en el que se construya un modelo estadístico para los efectos de las incertidumbres del modelo, utilizando simulaciones numéricas. El enfoque de inversión bayesiana es un marco natural para incorporar información sobre errores modelo en la reconstrucción de imágenes.

El objetivo de la inversión bayesiana es determinar la función de densidad de probabilidad de la cantidad primaria, condicionada sobre las observaciones. En aplicaciones prácticas, generalmente es necesario determinar algunas estimaciones puntuales para dar una visión concreta de la situación en el sensor de ECT. El cálculo de estimaciones puntuales habitualmente conlleva problemas de optimización que se resuelven utilizando el método de Newton o el método de Gauss-Newton. Alternativamente, otra estimación puntual popular es el valor previsto (condicional), que generalmente se busca utilizando métodos de integración basados en muestreo, tales como los métodos de Monte Carlo basados en cadenas de Markov.

Tras ajustar el modelo matemático para que exista una coherencia suficiente entre las mediciones y el modelo, se determina la ubicación de la interfaz de interés en el dominio objetivo, es decir la superficie límite 8, 18 o la superficie 10, 20 de un material 7, 17 de incrustación sobre la misma, basándose en el modelo ajustado. En la práctica, esto habitualmente se determina basándose en algunas discontinuidades en los valores de las cantidades eléctricas determinadas por el modelo, tales como la permitividad. La falta de tal discontinuidad da como resultado la determinación de la superficie límite como la interfaz de interés. Este tipo de situación es una indicación de que no hay incrustación sobre la superficie límite.

El cuerpo de soporte, tal como las tuberías 1, 11 de las Figuras 1 y 2, no pertenece necesariamente al equipo de proceso real a monitorizar, sino que puede proporcionarse en forma de una sonda de medición separada, situada en el equipo de proceso. Con el fin de garantizar un comportamiento suficientemente similar del cuerpo de soporte y el equipo de proceso real en sí, y por lo tanto la fiabilidad de la determinación de incrustación/desgaste basándose en la monitorización de la incrustación sobre el cuerpo de soporte y/o el desgaste del mismo, el cuerpo de soporte estará preferiblemente formado por el mismo material que el equipo de proceso real.

En resumen, el método ilustrado en la Figura 3 proporciona una manera fiable de determinar la presencia de incrustaciones sobre el equipo de proceso y/o el desgaste del mismo. Además, la tasa de formación de incrustaciones y/o del desgaste puede determinarse cuando se resuelve el problema de inversión con el tiempo, utilizando medidas secuenciales.

En los casos en los que puede asumirse que la formación de incrustaciones o el desgaste en un proceso son uniformes (por ejemplo, cuando el material de incrustación se deposita uniformemente sobre las paredes de una tubería o las paredes de un recipiente), es posible reducir el costo computacional del método aprovechando la simetría. La Figura 5 muestra una barra 31 que forma un cuerpo de soporte, y una configuración de electrodos en donde una pluralidad de electrodos anulares 32 están montados sobre la superficie 38 del cuerpo de soporte en forma de barra. Los campos potenciales generados por los electrodos en forma de anillo son cilíndricos simétricos.

Así, una aproximación del método de elementos finitos (FEM) utilizada para modelar el dominio objetivo solo podrá formularse en dos dimensiones (axial y radial), lo que reduce notablemente la complejidad computacional.

5 A modo de otra alternativa más, el cuerpo de soporte puede formarse como un simple cuerpo 41 de tipo placa, como es el caso en la sonda 40 de medición mostrada en la Figura 6. La sonda 40 de medición ejemplar de la Figura 6 está configurada para su instalación a través de una pared de un recipiente cilíndrico, de modo que el cuerpo 41 de soporte real, que tiene una pluralidad de electrodos 42 sobre el mismo, quede orientado hacia el interior del recipiente. La parte posterior de la sonda de medición comprende unos conectores 46 para conectar los electrodos 42 a la electrónica de medición apropiada. En el ejemplo de la Figura 6, están presentes electrodos 42 de diferentes tamaños.

10 La superficie límite 48 del cuerpo de soporte tiene una forma curvada, para coincidir con la superficie interior de la pared del recipiente cilíndrico. Naturalmente, la superficie límite de un cuerpo de tipo placa también podría ser plana, o tener alguna otra forma no plana distinta a la curvada que se muestra en la Figura 6. Además, debe tenerse en cuenta que el espesor de un cuerpo de soporte "de tipo placa" puede variar, de acuerdo con las condiciones de la aplicación real en cuestión.

15 La Figura 7 ilustra esquemáticamente un sistema 50 mediante el cual puede llevarse a cabo el método descrito anteriormente. En el núcleo operativo del sistema está presente un ordenador 51 que comprende un número apropiado de circuitos de memoria y procesadores, para almacenar el modelo matemático y llevar a cabo las etapas computacionales del método. El sistema comprende adicionalmente una unidad electrónica 52 de medición y una sonda 53 de medición, que comprende un cuerpo de soporte anular y una pluralidad de electrodos. El cuerpo de soporte y los electrodos pueden configurarse, p. ej., de acuerdo con los ilustrados en la Figura 2. La unidad electrónica de medición está conectada al ordenador de manera que el ordenador pueda monitorizar la unidad electrónica de medición, y que puedan enviarse los resultados de la medición al ordenador, para su recepción en el mismo y su posterior procesamiento. El ordenador comprende un código de programa configurado para controlar el ordenador, para llevar a cabo las etapas del método descrito anteriormente. Como resultado del método efectuado por el sistema, se genera una imagen 54 del dominio objetivo basándose en la distribución de la permitividad reconstruida dentro del dominio objetivo, dentro del cuerpo de soporte anular de la sonda 53 de medición. La imagen muestra la incrustación sobre la superficie límite del cuerpo de soporte, y el desgaste de la misma.

20
25
30
35 Resulta obvio para los expertos en la técnica que, con el avance de la tecnología, la idea básica de la invención podrá implementarse de diversas maneras. Por lo tanto, la invención y sus realizaciones no están limitadas a los ejemplos descritos anteriormente; en su lugar, pueden variar libremente dentro del alcance de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para determinar la ubicación de una interfaz (18, 20) de interés en un dominio objetivo (13) en un equipo de proceso industrial, entre un volumen libre (14) de un material fluido y un material sólido (11, 17), que limita dicho volumen libre, comprendiendo el método las etapas de:
- proporcionar un modelo matemático (21) del dominio objetivo (13) que determine, para una pluralidad de pares de grupos de electrodos, los electrodos (12) de los grupos de electrodos que están dispuestos en conexión de medición de capacitancia con el dominio objetivo y soportados por un cuerpo (11) de soporte sólido, que tiene una superficie límite (18) en el dominio objetivo, cuya superficie límite define una interfaz entre el cuerpo de soporte y su exterior, una cantidad eléctrica característica proporcional a la capacitancia de un condensador formado por un par de grupos de electrodos;
 - recibir mediciones de la cantidad eléctrica característica para una pluralidad de pares de grupos de electrodos;
 - ajustar el modelo matemático (21), para reducir las diferencias entre los valores de cantidad eléctrica característica medidos y los determinados por el modelo matemático; y
 - determinar la ubicación de la interfaz (18, 20) de interés basándose en el modelo matemático ajustado;
- en donde la etapa de ajuste del modelo matemático comprende variar la ubicación de la superficie límite (18) para tener en cuenta, al determinar la ubicación de la interfaz (18, 20) de interés, el posible desgaste de la superficie límite.
- 25 2. Un método según la reivindicación 1, en donde se discretiza el modelo matemático (21) en una pluralidad de elementos discretos, cada uno de los cuales representa una ubicación discreta, teniendo la discretización una densidad variable, aumentando la densidad hacia la superficie límite (18).
- 30 3. Un método según la reivindicación 1 o 2, en donde el cuerpo de soporte comprende un cuerpo tubular (1, 11), siendo la superficie límite la superficie interior (8, 18) del cuerpo tubular.
4. Un método según la reivindicación 1 o 2, en donde el cuerpo de soporte comprende una barra (31), siendo la superficie límite la superficie (38) de la barra.
- 35 5. Un método según la reivindicación 1 o 2, en donde el cuerpo de soporte comprende un cuerpo (41) de tipo placa, siendo la superficie límite una de las dos superficies principales (48) del cuerpo de tipo placa.
- 40 6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde la superficie límite (18) limita el dominio objetivo (13).
7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde la superficie límite (8) se encuentra dentro del dominio objetivo (3).
- 45 8. Un aparato para determinar la ubicación de una interfaz (18, 20) de interés en un dominio objetivo (13) en un equipo de proceso industrial, entre un volumen libre (14) de un material fluido y un material sólido (11, 17) que limita dicho volumen libre, comprendiendo el aparato al menos una memoria (51) y al menos un procesador (51), acoplado con la al menos una memoria; en donde la al menos una memoria comprende instrucciones de código de programa, que, al ser ejecutadas por el al menos un procesador, hacen que el aparato lleve a cabo las siguientes etapas:
- proporcionar un modelo matemático (21) del dominio objetivo (13) que determine, para una pluralidad de pares de grupos de electrodos, los electrodos (12) de los grupos de electrodos que están dispuestos en conexión de medición de capacitancia con el dominio objetivo y soportados por un cuerpo (11) de soporte sólido, que tiene una superficie límite (18) en el dominio objetivo, cuya superficie límite define una interfaz entre el cuerpo de soporte y su exterior, una cantidad eléctrica característica proporcional a la capacitancia de un condensador formado por un par de grupos de electrodos;
 - recibir mediciones de la cantidad eléctrica característica para una pluralidad de pares de grupos de electrodos;
 - ajustar el modelo matemático (21), para reducir las diferencias entre los valores de cantidad eléctrica característica medidos y los determinados por el modelo matemático; y
 - determinar la ubicación de la interfaz (18, 20) de interés basándose en el modelo matemático ajustado;
- en donde la etapa de ajuste del modelo matemático comprende variar la ubicación de la superficie límite (18) para tener en cuenta, al determinar la ubicación de la interfaz (18, 20) de interés, el posible desgaste de la superficie límite.
- 60 9. Un aparato (50) según la reivindicación 8, en donde el modelo matemático (21) se discretiza en una pluralidad de elementos discretos, cada uno de los cuales representa una ubicación discreta, teniendo la discretización una densidad variable, aumentando la densidad hacia la superficie límite (18).
- 65

ES 2 689 104 T3

10. Un aparato según la reivindicación 8 o 9, en donde el cuerpo de soporte comprende un cuerpo tubular (1, 11), siendo la superficie límite la superficie interior (8, 18) del cuerpo tubular.
- 5 11. Un aparato según la reivindicación 8 o 9, en donde el cuerpo de soporte comprende una barra (31), siendo la superficie límite la superficie (38) de la barra.
12. Un aparato según la reivindicación 8 o 9, en donde el cuerpo de soporte comprende un cuerpo (41) de tipo placa, siendo la superficie límite una de las dos superficies principales (48) del cuerpo de tipo placa.
- 10 13. Un aparato según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, en donde la superficie límite (18) limita el dominio objetivo (13).
- 15 14. Un aparato según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 13, en donde la superficie límite (8) se encuentra dentro del dominio objetivo (3).
- 15 15. Un programa informático que comprende un código de programa que, al ser ejecutado por un procesador (51), hace que el procesador lleve a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones 1-7.

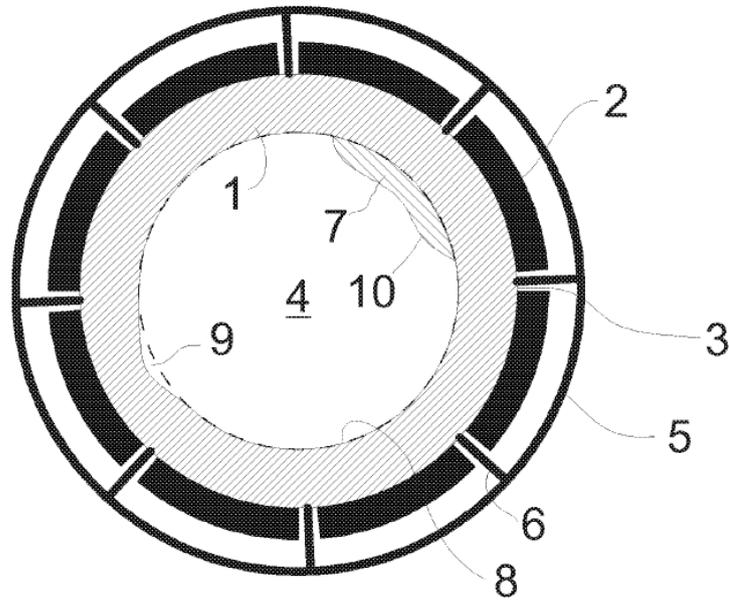


Fig. 1

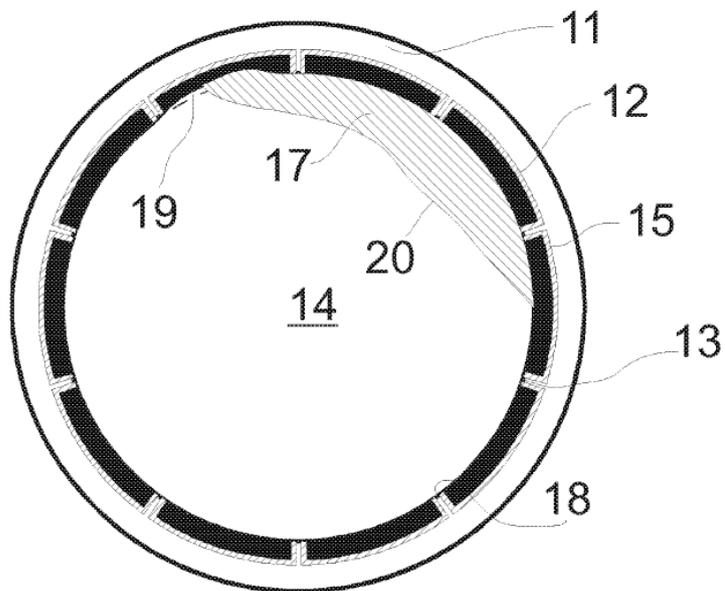


Fig. 2

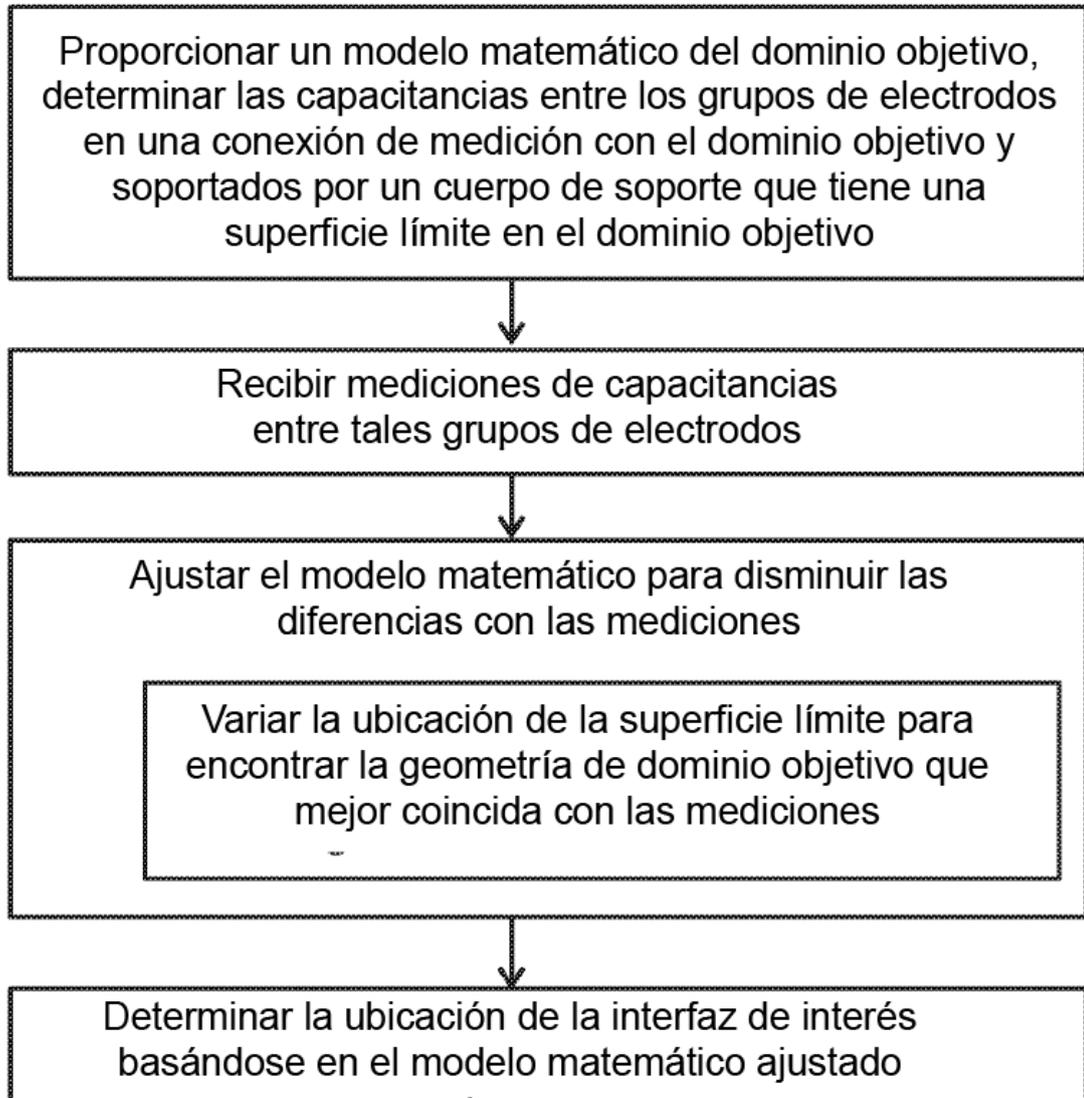


Fig. 3

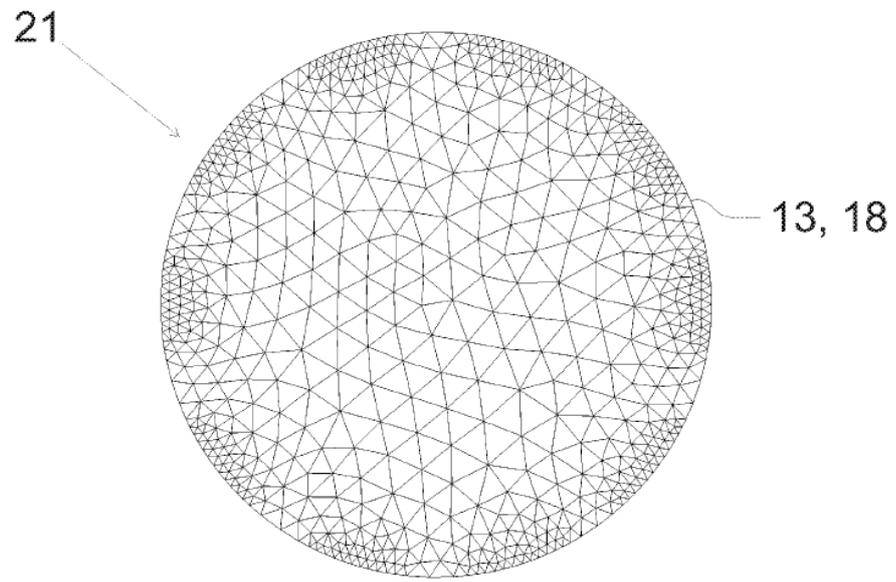


Fig. 4

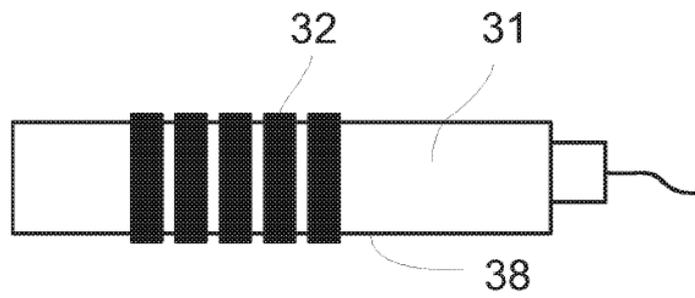


Fig. 5

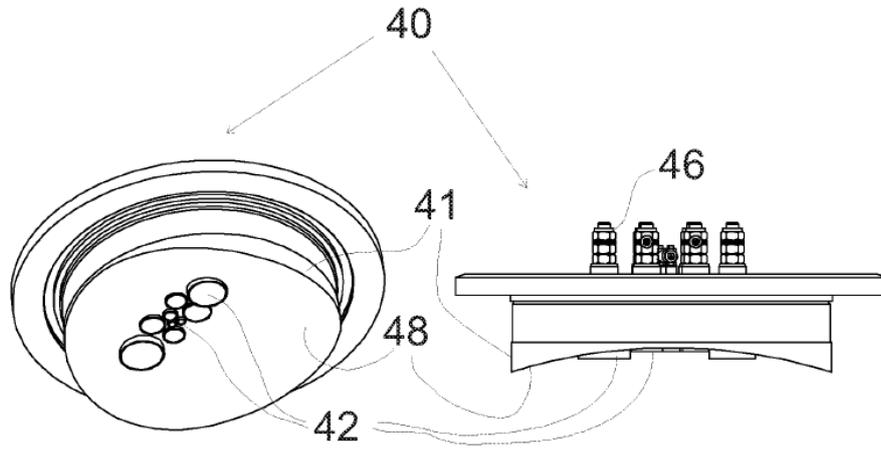


Fig. 6

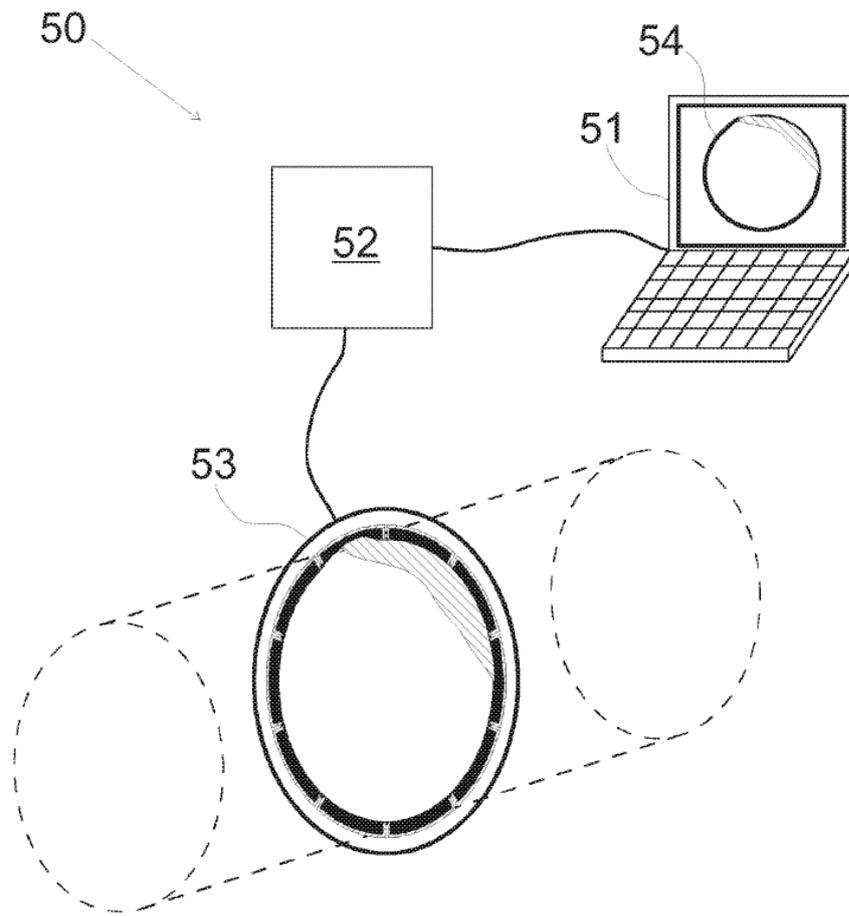


Fig. 7