

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 645 197**

51 Int. Cl.:

G01N 27/06 (2006.01)

G01N 27/07 (2006.01)

G01R 27/22 (2006.01)

G01V 3/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.09.2010 PCT/FI2010/050749**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.04.2011 WO11039416**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.09.2010 E 10819958 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.09.2017 EP 2483672**

54 Título: **Formación de imágenes tridimensionales de un flujo másico**

30 Prioridad:

29.09.2009 FI 20095994

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

04.12.2017

73 Titular/es:

**OUTOTEC (FINLAND) OY (100.0%)
Rauhalanpuisto 9
02230 Espoo, FI**

72 Inventor/es:

**KAIPIO, JARI;
LEHIKONEN, ANSSI;
VOUTILAINEN, ARTO y
VAUHKONEN, MARKO**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 645 197 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

Formación de imágenes tridimensionales de un flujo másico

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a la formación de imágenes de un volumen objetivo mediante tomografía de impedancia. Particularmente, la presente invención se centra en determinar la distribución de conductividad eléctrica de un flujo másico en un volumen objetivo tridimensional.

Antecedentes de la invención

10 Existen numerosas situaciones en diferentes tipos de procesos, por ejemplo, minería, procesamiento de alimentos o industrias de pasta y papel, en las que existe la necesidad de investigar las propiedades internas de un flujo másico en una tubería o cualquier recipiente. El objeto de la investigación puede ser, por ejemplo, el número y clase de burbujas de gas en un líquido o la mezcla de una sustancia adicional suministrada en el flujo.

15 Una técnica útil para dicha investigación de las propiedades del flujo es la tomografía de impedancia o tomografía por espectroscopia de impedancia. La palabra "tomografía" se refiere por lo general a la formación de imágenes en sección transversal. Por tomografía de impedancia se entiende en general las mediciones eléctricas realizadas por medio de electrodos colocados en la superficie del objetivo o dentro del mismo, y la determinación de la distribución de conductividad eléctrica del objetivo en función de las mediciones. Las variaciones locales de la conductividad determinadas como resultado de la tomografía de impedancia indican variaciones de la calidad de la masa fluida y, por lo tanto, pueden proporcionar información, por ejemplo, sobre las burbujas de gas u otras no uniformidades de la masa. En mediciones típicas, la corriente o la tensión se suministran entre dos electrodos particulares y la tensión o la corriente, correspondientemente, se miden entre estos u otros pares de electrodos. Naturalmente, se pueden usar simultáneamente varios pares de electrodos de suministro y de medición. Por tomografía de impedancia, en su forma básica, se entiende generalmente las mediciones efectuadas a una única frecuencia. Cuando las mediciones de impedancia se realizan en general a varias frecuencias dentro de un intervalo de frecuencias específico, el término utilizado habitualmente es espectroscopia de impedancia. La presente invención se refiere a la tecnología en la que la meta es producir reconstrucciones, es decir, imágenes de tomografía en un intervalo de frecuencias. Esta tecnología suele denominarse EIST, Tomografía por Espectroscopia de Impedancia Eléctrica. En este documento, la expresión "tomografía de impedancia" se usa para cubrir tanto la tomografía de impedancia en su significado convencional como la EIST.

20 Como se indicó anteriormente, en la tomografía de impedancia se calcula una estimación de la conductividad eléctrica del objetivo en función de la ubicación sobre la base de los resultados de la medición. Por lo tanto, el problema en cuestión es un problema inverso en el que las observaciones medidas, es decir, la tensión o la corriente, son utilizadas para determinar la situación real, es decir, la distribución de conductividad que causó las observaciones. El cálculo se basa en un modelo matemático que determina las relaciones entre las corrientes (o tensiones) inyectadas, la distribución de conductividad eléctrica del objetivo y las tensiones (o corrientes) en los electrodos. Las tensiones y las corrientes según el modelo se comparan con las suministradas y las medidas, y se minimizan las diferencias entre ellas mediante el ajuste de los parámetros del modelo hasta lograr la precisión deseada.

25 Una configuración de sensor convencional, utilizada para determinar las propiedades de un flujo másico en una tubería, comprende unos electrodos colocados simétricamente en un anillo de electrodos sobre la superficie interior de la tubería. En esta configuración convencional, el anillo de electrodos se encuentra en un plano perpendicular a la dirección del flujo. Este tipo de disposición de sensor permite formar imágenes aproximadas, en sección bidimensional, del flujo másico.

30 Para producir una imagen tridimensional correspondiente a la distribución de conductividad del flujo másico en un volumen objetivo tridimensional, se conocen disposiciones que comprenden varios anillos secuenciales de electrodos a lo largo de la tubería. Por supuesto, también en el caso de los electrodos ubicados dentro de un plano, las distribuciones de tensión y corriente se extienden también hasta cierto punto fuera de este plano, pero por ejemplo, una burbuja de aire fuera del plano provoca en los campos de tensión y corriente una desviación que es independiente del lado real del plano en el que se encuentra la burbuja. Por lo tanto, la medición no produce información sobre el lado del plano de electrodos en el que está realmente la burbuja. Cuando en la geometría de medición se incluye también la dirección a lo largo de la dirección del flujo, las mediciones también dan información sobre la distribución de conductividad en esta dirección. Sin embargo, varios anillos de electrodos hacen que el sensor de medición sea bastante complejo e incrementa su tamaño. Una mayor cantidad de electrodos, naturalmente, también aumenta el costo del sensor.

35 También se conocen soluciones donde, además de las situaciones estacionarias, se determina la distribución de conductividad en función del tiempo. En este tipo de casos, la reconstrucción de la distribución de conductividad basada en un modelo y en mediciones es una cuestión de inversión dinámica. Una distribución de conductividad variable en el tiempo, así generada, puede ser utilizada para investigar, por ejemplo, el arrastre de burbujas de aire o algún material adicional dentro del flujo. En la inversión dinámica, también se incluye el movimiento del flujo másico

en el modelo de conductividad que constituye la base para el cálculo. El movimiento del flujo másico en la tubería puede modelarse, por ejemplo, mediante un modelo de flujo adecuado combinado con un modelo de difusión por convección. La dinámica involucrada en el flujo másico también puede describirse de manera más directa mediante algún modelo sencillo de análisis por series de tiempo.

5 Las configuraciones de sensor, descritas anteriormente, que comprenden varios anillos secuenciales de electrodos se utilizan también en los casos de inversión dinámica tridimensional de las soluciones de la técnica anterior. El cálculo se basa en un modelo espacial de estados de la conductividad, siendo el estado a examinar la conductividad eléctrica en el volumen objetivo. El método de cálculo es la denominada estimación de estados, cuyos principios son bien conocidos, por ejemplo, en el campo de la ingeniería del control automático. En lugar de determinar solo un estado estacionario, en la técnica de estimación de estados también se estima el estado siguiente sobre la base del (los) estado(s) previo(s). Además de un modelo de observación que comprende, en el caso de la tomografía de impedancia, la distribución de tensión / corriente / conductividad, el modelo espacial de estados también comprende un denominado modelo de evolución que describe cómo la conductividad eléctrica cambia en función del tiempo.

10 Al igual que en los problemas inversos en general, también en la estimación de estados se comparan las situaciones según la observación y los modelos de evolución con las situaciones suministradas y medidas, y se ajusta el modelo espacial de estados según se requiera para minimizar las diferencias entre los resultados modelados y los reales, es decir, los valores suministrados y medidos. Se conocen diversos métodos alternativos a nivel práctico para realizar los cálculos. Se describen con más detalle ejemplos de soluciones que explotan la estimación de estados por inversión dinámica, por ejemplo, en las referencias [1] - [4] enumeradas a continuación:

20 [1] A. Seppänen, M. Vauhkonen, PJ Vauhkonen, E. Somersalo, JP Kaipio: "State estimation with fluid dynamical evolution models in process tomography – An application with impedance tomography", Problemas inversos 17: 467-483, 2001.

[2] A. Seppänen, M. Vauhkonen, PJ Vauhkonen, E. Somersalo, JP Kaipio: "Fluid dynamical models and state estimation in process tomography: Effect due to inaccuracies in flow fields", J. Electr. Imag., 10 (3); 630-640, 2001.

25 [3] A. Seppänen, L. Heikkinen, T. Savolainen, A. Voutilainen, E. Somersalo, JP Kaipio: "An experimental evaluation of state estimation with fluid dynamical models in process tomography", Chemical Engineering Journal, 127: 23- 30, 2007

30 [4] A. Seppänen, M. Vauhkonen, PJ Vauhkonen, A. Voutilainen, JP Kaipio: "State estimation in three dimensional impedance imaging - Use of fluid dynamical evolution models", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 73: 1651- 1670, 2008

Compendio de la invención

El método, el aparato y el programa informático según la presente invención se caracterizan por lo que se presenta en las reivindicaciones 1, 7 y 13, correspondientemente.

35 El método de la presente invención es un método para determinar la conductividad eléctrica de un flujo másico en un volumen objetivo tridimensional, es decir, la distribución tridimensional de la conductividad dentro de dicho volumen. El flujo másico puede consistir en cualquier material líquido que posiblemente contenga también sustancias sólidas y/o gaseosas. El término "flujo" debe entenderse ampliamente en esta memoria. En las aplicaciones más típicas, la masa fluye continuamente a través de un volumen objetivo dentro de una tubería. Sin embargo, el volumen objetivo también puede encontrarse en un recipiente cuando sea concebible que no existe un flujo circulante real, sino que el flujo puede comprender, por ejemplo, un movimiento circular alrededor del recipiente.

40 Ejemplos de las aplicaciones de la presente invención son diferentes tipos de procesos, por ejemplo, minería, procesamiento de alimentos o industrias de pulpa y papel.

45 El método comprende las etapas de: recoger los valores de corriente o tensión generados al suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo y medir la corriente o la tensión correspondientemente inducida en el volumen objetivo; proporcionar un modelo espacial de estados que define las relaciones entre la conductividad eléctrica, la tensión y la corriente en el volumen objetivo y que también define la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo; comparar las corrientes y/o las tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas; modificar según se requiera el modelo espacial de estados para reducir las diferencias entre los resultados calculados y los medidos hasta lograr una consistencia predeterminada entre el modelo y los valores medidos; y determinar la conductividad eléctrica del flujo másico en el volumen objetivo según el modelo espacial de estados modificado.

50 La etapa de recoger los valores de corriente o de tensión se puede realizar usando principios y equipos como los conocidos en la técnica. Por ejemplo, cuando los valores medidos se presenten en forma electrónica, se pueden usar medios adecuados de transferencia y almacenamiento de datos. Dichos medios pueden comprender, por ejemplo, un ordenador conectado a un equipo de medición eléctrica.

El principio básico del modelo matemático espacial de estados de un tipo utilizado en la presente invención se puede determinar, por ejemplo, por las siguientes ecuaciones:

$$V_t = U_t (\sigma_t) + v_t$$

$$\sigma_{t+1} = f_t \sigma_t + w_t ,$$

5 en donde la ecuación superior se refiere a un modelo de observación y la inferior a un modelo de evolución. V_t denota observación(es) en un momento t , por ejemplo, las tensiones medidas, $U_t (\sigma_t)$ determina un modelo matemático en base al cual se pueden calcular las tensiones correspondientes, σ_t es la distribución en un tiempo t de la conductividad eléctrica, v_t es el llamado ruido de observación, $f_t \sigma_t$ determina un modelo de evolución y w_t el ruido en el mismo. El modelo espacial de estados real puede ser cualquiera de los tipos de modelo espacial de estados conocidos en este campo. En general, la meta de la técnica de estimación de estados es encontrar estimaciones para las variables de estado desconocidas σ_t para $t = 1, 2, \dots, n$. El enfoque de la estimación de estados conduce a un algoritmo computacional recursivo. Los algoritmos más comunes utilizados en los métodos de estimación de estados en general son el filtro de Kalman y sus variantes, como el predictor de Kalman, el suavizador de Kalman, el suavizador de retardo fijo, el filtro de Kalman extendido, el filtro de Kalman ampliado iterado, etc. Estos son aplicables en el caso de modelos espaciales de estados lineales con procesos de ruido Gaussiano. En otros tipos de casos más complicados, las variables de estado, es decir, en este caso la conductividad eléctrica, pueden estimarse utilizando, por ejemplo, filtros de partículas.

Para dicha comparación de las corrientes y tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas, primero se ajusta en el modelo una señal de excitación consistente con la realmente suministrada. A continuación, se calculan los valores de respuesta de tensión o de corriente, en las ubicaciones correspondientes a las condiciones utilizadas para suministrar y medir las señales de tensión y corriente, según el modelo espacial de estados, y se comparan los valores calculados con los valores realmente medidos. Dicha iteración por modificación del modelo espacial de estados, para reducir las diferencias entre los resultados calculados y los resultados suministrados y medidos, continúa hasta que se alcance la consistencia deseada entre el modelo y los valores medidos. Después de la modificación iterativa, se determina la distribución de conductividad eléctrica, variable en el tiempo, del flujo másico en el volumen objetivo tridimensional según el modelo espacial de estados modificado. Esta determinación se basa en las ecuaciones involucradas en el modelo espacial de estados. Al usar esas ecuaciones, la distribución de conductividad se puede presentar, por ejemplo, como un conjunto de datos que comprende valores de conductividad calculados para puntos discretos dentro del volumen objetivo tridimensional.

Preferiblemente, al menos una parte del método de acuerdo con la presente invención se realiza automáticamente por medio de un software informático, es decir, un programa informático instalado, por ejemplo, en un sistema de control de producción de la planta industrial en cuestión. Los resultados quedan así rápidamente disponibles en forma electrónica para un posterior análisis y control del proceso. Por medio de dicho software, una o más de las etapas del método también pueden ser operadas manualmente, al menos en parte.

La presente invención está basada en la sorprendente observación, por parte de los inventores, de que al usar la inversión dinámica y la estimación de estados en la determinación de la conductividad eléctrica, es posible determinar el estado, dependiente del tiempo, de la conductividad eléctrica del flujo másico en un volumen objetivo tridimensional por medio de la información de conductividad originada sólo en un único plano. Por lo tanto, de acuerdo con los principios básicos de la presente invención, los valores de corriente o tensión recogidos son seleccionados para que consistan en los resultados de mediciones realizadas sustancialmente dentro de un plano, y se proporciona el modelo espacial de estados de manera que comprenda el campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico dentro del volumen objetivo. Así, a diferencia de los métodos de determinación tridimensional de la conductividad de la técnica anterior, que utilizan una información medida que se reúne tridimensionalmente a lo largo de la dirección del flujo másico, en la presente invención las mediciones pueden realizarse dentro de sólo un único plano. Este es un gran paso adelante y abre una gran variedad de posibilidades novedosas y mejoradas para la formación de imágenes de flujo másico. Desde el punto de vista del método de determinación, la presente invención aumenta en gran medida la eficacia de la determinación de la conductividad, ya que ahora se puede realizar un análisis tridimensional sobre datos brutos bidimensionales. En otras palabras, ahora se puede extraer de los datos de medición bidimensionales mucha más información de la que es posible con las soluciones de la técnica anterior. Desde el punto de vista del equipo de medición, el enfoque de medición en un plano único permite unos cabezales sensores radicalmente más pequeños que pueden usarse en ubicaciones de equipos de proceso que no eran posibles con los sensores tradicionales. Por otro lado, debido al menor tamaño y a la estructura mecánica más sencilla del cabezal sensor habilitado por la presente invención, también los costes de fabricación se mantienen más bajos. Además, también la electrónica y el software necesarios para suministrar y medir las señales eléctricas pueden ser más sencillos.

La característica clave que permite la determinación de conductividad tridimensional, sobre la base de los valores de corriente o tensión obtenidos en un solo plano, es dicho modelo espacial de estados que comprende el campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico. La expresión "que comprende el campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico" significa en esta memoria que el modelo espacial de estados, en realidad las ecuaciones del modelo de evolución, contienen la información necesaria para que también puedan tenerse en cuenta en los

cálculos las direcciones y velocidades, variables en el tiempo, del flujo másico en diferentes puntos del volumen objetivo. Esto elimina el problema de identificación, relacionado con la simetría, intrínsecamente presente en las mediciones bidimensionales, es decir, el problema que surge del hecho de que dos situaciones diferentes, simétricas con respecto al plano de medición, produzcan resultados de medición idénticos.

5 Resumiendo, la presente invención utiliza para el parámetro desconocido un modelo en el que este parámetro, es decir, la conductividad, se representa como un proceso dependiente del tiempo. El modelo está formado para eliminar el problema de ambigüedad relacionado con la simetría que surge de un solo plano de observación o medición dentro del volumen objetivo tridimensional. Los modelos dependientes del tiempo, como tales, también son conocidos en la técnica anterior. Sin embargo, en las soluciones conocidas: 1) la configuración de medición ha sido
10 tridimensional, por lo tanto, no causaba en absoluto el problema de ambigüedad relacionado con la simetría; o 2) para el parámetro desconocido se ha utilizado un modelo independiente del tiempo; o 3) se ha asumido que el parámetro desconocido es simétrico (por ejemplo, el llamado modelo de dos dimensiones y media). Por lo tanto, la presente invención usa por primera vez el modelo dependiente del tiempo para eliminar el problema de ambigüedad.

15 El modelo de evolución, como parte del modelo espacial de estados, juega un papel crucial en los cálculos según la presente invención, por lo que la selección adecuada del tipo de modelo de evolución es muy importante. Por ejemplo, no se puede usar el modelo de camino aleatorio utilizado comúnmente. Como ya se indicó anteriormente, el problema de falta de identificabilidad relacionado con la simetría debe resolverse en el modelo espacial de estados mediante dicha inclusión del campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico.

20 Una opción preferible es determinar la variación de la conductividad en el tiempo mediante una ecuación de convección-difusión. A partir del modelo de convección-difusión, se obtiene un grupo de ecuaciones diferenciales a través de discretización por FEM (Método de Elementos Finitos) para describir los cambios de conductividad en los puntos nodales del área de cálculo. El uso de dicho modelo requiere que se conozcan las conductividades de los puntos nodales en el borde de entrada de flujo del área de cálculo. Sin embargo, dado que debe estimarse la distribución de conductividad en su conjunto y no es conocida en ningún punto del volumen objetivo, la
25 conductividad en el borde de entrada de flujo debe ser descrita por algún modelo matemático. Los posibles modelos son numerosos, pero puede variar su efectividad. A continuación se describe un ejemplo de un enfoque adecuado.

En el ejemplo, la distribución de conductividad en el borde de entrada de flujo se presenta por medio de dos componentes, el primero de ellos modela la fluctuación de la conductividad y el segundo las faltas de homogeneidad locales. El primer componente es localmente constante en el borde de entrada de flujo (homogéneo, es decir, sin
30 variación espacial), pero se modela como un parámetro (proceso) dependiente del tiempo. La evolución temporal de este término se describe mediante un modelo de series de tiempo de orden superior (>1) o mediante una ecuación diferencial estocástica. En este ejemplo, se utiliza un modelo autorregresivo AR(2). El segundo componente representa las faltas de homogeneidad que se desvían del valor promedio en el borde de entrada de flujo. También la evolución de este componente en el tiempo (un proceso valorado por vectores) se describe mediante un modelo de series de tiempo de mayor orden o mediante una ecuación diferencial estocástica. En este ejemplo, también se
35 utiliza un modelo AR(2) de segundo orden para este componente. La distribución de conductividad en el borde de entrada de flujo se modela así como la suma de estos dos componentes. En este ejemplo, los coeficientes del modelo de la parte homogénea se eligen de manera que la conductividad prevista en un momento específico sea extrapolada linealmente de los dos valores anteriores. La varianza del término de ruido relativo al modelo se selecciona sobre la base de la tasa esperada de variaciones de la conductividad media del volumen objetivo. El modelo en cuestión es inestable, es decir, la varianza crece ilimitadamente a lo largo del tiempo. Sin embargo, el modelo es útil porque garantiza un comportamiento suave con respecto al tiempo y no limita los valores de conductividad, pero permite grandes fluctuaciones de los mismos. Dado que las observaciones proporcionan información sobre la conductividad media en el entorno del plano de medición, la estimación del componente homogéneo del modelo se estabiliza y este (el componente homogéneo) no varía arbitrariamente durante la
40 estimación. Los coeficientes del componente no homogéneo y la covarianza se seleccionan en este ejemplo para que el proceso sea uniforme/correlativo en el tiempo, la media sea cero y la estructura de la covarianza corresponda tanto a las fluctuaciones esperadas como a la tasa de cambio. La covarianza del término de ruido se puede elegir correctamente para que el ruido esté espacialmente correlacionado. Esto se puede lograr, por ejemplo, mediante la
45 construcción de un modelo de proceso bidimensional suave a través del borde de entrada de flujo.

El ejemplo que se analiza en esta memoria se basa en la suposición de que el equipo utilizado para recoger los valores de corriente o tensión está acoplado al volumen objetivo a través de una pluralidad de electrodos independientes. Si las impedancias de contacto de los electrodos son también cantidades a estimar, debe determinarse también un modelo similar de evolución para ellas. La evolución temporal de cada una de las
55 impedancias de contacto a estimar se describe mediante un modelo de series de tiempo de mayor orden o una ecuación diferencial estocástica. La varianza del término de ruido se selecciona según el comportamiento esperado para la tasa de cambio de las impedancias de contacto. Si algunos de los electrodos no se utilizan para suministrar las señales de excitación, es útil fijar muy baja la varianza del ruido de los términos que describen las impedancias de contacto de estos electrodos. A un nivel práctico, existen varios enfoques alternativos para estimar las impedancias de contacto. Una posibilidad es estimar los electrodos de suministro por separado y establecer para las impedancias de contacto del resto de los electrodos un valor (dependiente del tiempo) que corresponda al promedio de las impedancias de contacto estimadas.

5 El modelo necesario para el procedimiento de estimación real se forma recogiendo todos los términos desconocidos de los modelos descritos anteriormente en un mismo vector de estado y generando para él un único modelo común sobre la base de los modelos independientes. Por lo tanto, dependiendo del modelo físico que describe la situación real, se obtiene un modelo computacional lineal o no lineal dependiente del tiempo, cuyo modelo se puede usar como modelo de evolución de estado en el algoritmo de cálculo (por ejemplo, un filtro Kalman, EKF, IEKF).

10 En una realización preferida de la presente invención, para las etapas de comparar las corrientes y/o tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas y modificar según se requiera el modelo espacial de estados, se genera un conjunto de datos que comprende correspondientemente los valores de corriente y/o tensión según el modelo espacial de estados dentro del volumen objetivo. Este tipo de conjunto de datos puede almacenarse y procesarse, p. ej., actualizarse después de cada ronda de modificaciones del modelo espacial de estados, de manera eficiente y automática, mediante un dispositivo de procesamiento de datos eléctricos y un software adecuado ejecutado en el mismo.

15 En una realización de la presente invención, la etapa de recoger valores de corriente o tensión comprende: usar una pluralidad de electrodos en conexión de medición con el volumen objetivo, estando los electrodos colocados sustancialmente dentro de un plano; suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo entre dos de los electrodos; y medir la corriente o la tensión, correspondientemente, entre dos de los electrodos. Una pluralidad de electrodos colocados de esta manera y las mediciones realizadas por medio de estos electrodos constituyen una manera eficiente de efectuar la recogida de los datos brutos.

20 Los electrodos pueden ser de cualquier tipo y estructura conocidos y adecuados para mediciones de tomografía de impedancia y los detalles o el número de los mismos no están en el núcleo de la invención. La conexión de medición significa que cada uno de los electrodos puede suministrar una señal de excitación y/o medir una señal de respuesta procedente del flujo másico. Así, preferiblemente, pero no necesariamente, los electrodos están en contacto directo con el flujo másico. Los electrodos pueden ubicarse, por ejemplo, en la(s) pared(es) del volumen interno de una tubería u otra estructura que transporte el flujo másico a investigar. Se puede utilizar ya sea tensión o corriente como
25 señal de excitación en las mediciones utilizadas para investigar la conductividad. En el primer caso, el parámetro a medir es más típicamente la corriente, y en el último la tensión. Sin embargo, también es posible que el parámetro medido sea el mismo que el suministrado. En este caso, es decir, si tanto el parámetro suministrado como el medido son tensión o tanto el parámetro suministrado como el medido son corriente, al menos uno de los dos electrodos de medición debe ser diferente de los dos electrodos de suministro. Dicha expresión de suministrar tensión o corriente
30 entre dos de los electrodos significa, por supuesto, que la señal de excitación es suministrada al menos entre dos de los electrodos. Naturalmente, es posible y a menudo también razonable suministrar, por ejemplo, corriente de excitación simultáneamente entre varios pares de electrodos. En principio, es incluso posible suministrar simultáneamente corriente entre algún par de electrodos y tensión entre otro par de electrodos. Similarmente, las mediciones pueden realizarse simultáneamente entre varios pares de electrodos, y las mediciones pueden continuar
35 durante más tiempo que el de suministro de la señal de excitación y/o repetirse varias veces por cada suministro de señal de excitación.

40 Preferiblemente, los electrodos según la presente invención se colocan para que el plano que determinan sea sustancialmente perpendicular a la dirección de propagación media del flujo másico en el volumen objetivo. La posición perpendicular minimiza el espacio que necesita el sensor que comprende los electrodos, lo que permite una configuración de sensor muy compacta.

Los electrodos pueden sujetarse, por ejemplo, a una sonda de medición longitudinal dispuesta para extenderse hasta el volumen objetivo. En una realización muy preferible de la presente invención, los electrodos se colocan en una configuración anular que rodea el volumen objetivo. En esta realización, se pueden lograr mediciones muy precisas a lo largo de toda la sección transversal del volumen objetivo encerrada por el anillo de electrodos.

45 El aparato de la presente invención es un aparato para determinar la conductividad eléctrica de un flujo másico en un volumen objetivo tridimensional. El aparato comprende: unos medios de recogida para recoger los valores de corriente o tensión, generados al suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo, y medir la corriente o la tensión, correspondientemente, inducidas de ese modo en el volumen objetivo; unos primeros medios de determinación para determinar un modelo espacial de estados que define las relaciones entre la conductividad eléctrica, la tensión y la corriente en el volumen objetivo y que también define la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo; unos medios de comparación para comparar las corrientes y/o las tensiones según el
50 modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas; unos medios modificadores para modificar según se requiera el modelo espacial de estados para reducir las diferencias entre los resultados calculados y los medios; y unos segundos medios de determinación para determinar la conductividad eléctrica del flujo másico en el volumen objetivo según el modelo espacial de estados modificado.
55

Los medios de recogida pueden implementarse mediante uno o más dispositivos de cualquier tipo adecuado para recoger dichos valores de corriente o tensión. A modo de ejemplo, los medios de recogida pueden comprender un ordenador dispuesto para recibir, a través de alguna conexión adecuada de transferencia de datos, los datos medidos procedentes de un dispositivo de medición externo.

- 5 Similarmente, los primeros y segundos medios de determinación, los medios de comparación y los medios de modificación pueden comprender equipos de cualquier tipo conocido en la técnica y capaz de realizar las operaciones previstas para los mismos. En la práctica, al menos algunas de las operaciones de primera y segunda determinaciones, comparación y modificación se realizan más preferiblemente por medio de programas informáticos que ejecutan dichas operaciones automáticamente, al menos en parte. Como es evidente para un experto en la técnica, una o más de dichas operaciones previstas pueden ser efectuadas realmente por un mismo dispositivo único, por ejemplo, un ordenador y uno o más softwares adecuados ejecutados en el mismo. En otras palabras, dichos medios definidos por separado en la presente memoria no necesariamente significan dispositivos reales separados.
- 10 Como núcleo de la invención, los medios de recogida están dispuestos para seleccionar los valores de corriente o tensión recogidos para que consistan en los resultados de mediciones realizadas sustancialmente dentro de un plano; y los primeros medios de determinación están dispuestos para determinar el modelo espacial de estados de modo que comprenda el campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico dentro del volumen objetivo. Los principios de esta idea básica de la presente invención, así como las ventajas proporcionadas por la misma, ya se han discutido anteriormente en el contexto del aspecto del método de la presente invención. Lo mismo aplica a las siguientes realizaciones preferidas.
- 15 Preferiblemente, los primeros medios de determinación están dispuestos para determinar la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo en el modelo espacial de estados por medio de un modelo de convección-difusión.
- 20 En una realización preferida, para comparar las corrientes y/o tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas y modificar según se requiera el modelo espacial de estados, el aparato comprende medios para generar un conjunto de datos que comprende valores de corriente y/o tensión según el modelo espacial de estados, correspondientemente, dentro del volumen objetivo.
- 25 En una realización preferida, los medios de recogida comprenden unos electrodos en una conexión de medición con el volumen objetivo, estando los electrodos colocados sustancialmente dentro de un plano, y unos medios de suministro y de medición para suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo entre dos de los electrodos y medir la corriente o la tensión entre dos de los electrodos. Como ya se indicó anteriormente en la sección relativa al método, los electrodos pueden ser de cualquier tipo conocido y adecuado para suministrar y medir señales de tensión y/o corriente. Los electrodos de suministro y de medición pueden ser los mismos, o se pueden usar diferentes grupos de electrodos para suministrar y medir las señales.
- 30 Dichos medios de suministro y medición pueden comprender cualquier combinación de dispositivos eléctricos y electrónicos conocidos, posiblemente controlados por software(s) informático(s), comúnmente utilizados para suministro de energía, generación de señales y mediciones eléctricas.
- 35 Los electrodos se colocan preferiblemente de modo que el plano que determinan sea sustancialmente perpendicular con respecto a la dirección de propagación media del flujo másico en el volumen objetivo.
- En una realización preferida, los electrodos se colocan en una configuración anular que rodea el volumen objetivo.
- Como ya se indicó anteriormente, las características y rasgos preferibles del aparato de la presente invención están orientados a los propósitos y proporcionan las ventajas descritas anteriormente con respecto al método de la presente invención.
- 40 Además de los aspectos del método y el aparato, los principios de la presente invención también pueden implementarse como un programa informático. El programa informático según este aspecto de la presente invención comprende un código de programa dispuesto para realizar, cuando se ejecuta en un procesador de datos adecuado, las etapas de un método según la presente invención.
- 45 Además de la tomografía de impedancia, el principio básico de la presente invención de utilizar un modelo espacial de estados que comprende el campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico dentro del volumen objetivo, lo que permite un análisis tridimensional basado solo en datos de medición bidimensionales, puede aplicarse también al análisis de flujo másico realizado por medio de tomografía de capacitancia eléctrica, ECT. En la ECT, la distribución de la permitividad dieléctrica es la propiedad eléctrica que se determinará en lugar de la conductividad.
- 50 Una configuración típica de un sistema de medición por ECT consiste en un anillo de electrodos metálicos alrededor de un tubo o recipiente (o dentro de un tubo o recipiente en la superficie de una sonda, por ejemplo), ya sea en la pared exterior o interior del tubo o recipiente. En la mayoría de los casos, los electrodos no están en contacto con el material que fluye, sino que hay una capa delgada de material aislante entre el electrodo y el volumen objetivo. La meta de la ECT es visualizar la distribución de materiales dieléctricos (no conductores) por medio de contrastes de permitividad.
- 55 En la ECT, la totalidad del sensor de medición está generalmente rodeada por una pantalla metálica para detener los campos electromagnéticos. En un procedimiento de medición estándar, se aplica una tensión de excitación a uno

de los electrodos (fuente), mientras los electrodos restantes (detectores) están conectados a tierra, y se mide la carga en cada uno de los electrodos detectores. Esto proporciona un conjunto de mediciones de capacitancia entre fuente y detector. Este proceso continúa hasta que cada electrodo del sistema sensor haya servido una vez como electrodo fuente, completando así la recogida de todas las mediciones de capacitancia mutua entre todos los pares de electrodos.

Quando se aplica el enfoque de la presente invención al caso de la ECT, es preciso realizar una pequeña modificación del modelo directo en comparación con la EIT, pero la idea básica del análisis tridimensional basado en una disposición de medición en un plano sigue siendo la misma. Por lo tanto, en el caso de la ECT también se puede utilizar el mismo enfoque espacial de estados, con el modelo de flujo apropiado y el modelo directo correcto.

10 **Descripción detallada de la invención**

A continuación se describen con más detalle las realizaciones ejemplares preferibles de la presente invención mediante la siguiente explicación i) sobre simulaciones efectuadas para probar la aplicabilidad de las mediciones de la capa única de electrodos para formar imágenes tridimensionales del volumen objetivo, y ii) sobre un aparato según la presente invención. Las explicaciones están ilustradas por las figuras adjuntas, en donde:

15 La Figura 1 muestra la geometría del volumen objetivo y la configuración de electrodos utilizada en las simulaciones,

Las Figuras 2 - 4 muestran los resultados obtenidos en las simulaciones, y

La Figura 5 muestra una figura esquemática de un aparato ejemplar según la presente invención.

i) Simulaciones

20 El modelo de observación utilizado en las simulaciones tenía la forma

$$V_{\tau} = f_{\tau}(\theta_{\tau}) + \varepsilon_{\tau} \tag{1}$$

En donde V_{τ} son las tensiones medidas y el subíndice τ es un índice de tiempo discreto que se refiere al instante de tiempo ($t = t_{\tau}$) de la medición, $f_{\tau}(\theta_{\tau})$ son las correspondientes tensiones calculadas, el vector θ_{τ} contiene todos los términos desconocidos presentes en los modelos de evolución y observación, incluyendo la conductividad σ_{τ} y la impedancia de contacto z_{τ} , y ε_{τ} es el ruido. El modelo de evolución de la variable de estado aumentada θ_{τ} es

$$25 \theta_{\tau+1} = F\theta_{\tau} + v_{\tau}, \tag{2}$$

en donde la matriz de evolución F se obtiene combinando todos los modelos de evolución independientes. El ruido de estado relacionado con el modelo aumentado se denota con v_{τ} .

30 El problema de la estimación de estados es encontrar estimaciones para las variables de estado desconocidas θ_{τ} , $\tau = 1, 2, \dots$ dados los modelos de observación y evolución (ecuaciones (1) y (2)) y las observaciones $\{ V_k, k \in I \}$

en donde I es un conjunto de índices de tiempo de las observaciones disponibles. El enfoque de la estimación de estados conduce a un algoritmo computacional recursivo, del cual se han enumerado anteriormente ejemplos en la sección de compendio. En las simulaciones en cuestión, se usó un filtro Kalman ampliado iterado (IEKF) y un suavizador de intervalo fijo (FIS).

35 En el IEKF, los modelos no lineales y no gaussianos son sustituidos por aproximaciones lineales y gaussianas y, además, se incluye una iteración interna para encontrar un punto de linealización óptimo θ^* . Dados el punto inicial $\theta_{1|0}$ y la covarianza $\Gamma_{1|0}$ y una conjetura para el punto de linealización θ^* , las ecuaciones de IEKF relacionadas con el modelo espacial de estados anterior son

para $i = 1 : n$

$$40 G = \Gamma_{\tau/\tau-1} J_{\tau}(\theta^*)^T (J_{\tau}(\theta^*) \Gamma_{\tau/\tau-1} J_{\tau}(\theta^*)^T + \Gamma_{\varepsilon\tau})^{-1} \tag{3}$$

$$\theta^* = \theta_{\tau/\tau-1} + G_{\tau} (V_{\tau} - (V(\theta^*) + J_{\tau}(\theta^*)(\theta_{\tau/\tau-1} - \theta^*))) \tag{4}$$

y

$$G_{\tau} = \Gamma_{\tau/\tau-1} J_{\tau}(\theta^*)^T (J_{\tau}(\theta^*) \Gamma_{\tau/\tau-1} J_{\tau}(\theta^*)^T + \Gamma_{\varepsilon\tau})^{-1} \tag{5}$$

$$\theta_{\tau/\tau} = \theta_{\tau/\tau-1} + G_{\tau} (V_{\tau} - (V(\theta^*) + J_{\tau}(\theta^*)(\theta_{\tau/\tau-1} - \theta^*))) \tag{6}$$

$$45 \Gamma_{\tau/\tau} = (I - GJ_{\tau}(\theta^*)) \Gamma_{\tau/\tau-1} \tag{7}$$

$$\theta_{\tau+1/\tau} = F \theta_{\tau/\tau} \tag{8}$$

$$\Gamma_{\tau+1/\tau} = F \Gamma_{\tau/\tau} F^T + \Gamma_{vt} \quad (9)$$

en dónde $J_{\tau}(\theta) = \partial f_{\tau}(\theta) / \partial \theta$ y n es el número de iteraciones internas.

Si el punto de linealización θ^* es fijo, la iteración interna, es decir, el sistema de ecuaciones (3) y (4), desaparece y obtenemos las ecuaciones de filtro de Kalman.

- 5 El suavizador de intervalo fijo (FIS) estima $\theta_{\tau/\tau_{max}}$ y las covarianzas asociadas se pueden obtener a partir de los resultados de IEKF con la recursión hacia atrás

$$\Xi_{\tau-1} = \Gamma_{\tau-1/\tau-1} F^T \Gamma_{\tau/\tau-1}^{-1} \quad (10)$$

$$\theta_{\tau-1/\tau_{max}} = \theta_{\tau-1/\tau-1} + \Xi_{\tau-1} (\theta_{\tau/\tau_{max}} - \theta_{\tau/\tau-1}) \quad (11)$$

$$\Gamma_{\tau/\tau_{max}} = \Gamma_{\tau-1/\tau-1} + \Xi_{\tau-1} (\Gamma_{\tau/\tau_{max}} - \Gamma_{\tau/\tau-1}) \Xi_{\tau-1}^T \quad (12)$$

- 10 La geometría utilizada en las simulaciones comprendía un tubo circular recto con un diámetro de 4,8 cm. Como se muestra en la Figura 1, la longitud del volumen objetivo 2 era de 14 cm. Los electrodos 3 estaban ubicados en medio del volumen y dispuestos como un anillo anular de electrodos rodeando el volumen interno de la tubería, es decir, el volumen objetivo 2. La Figura 1 muestra que el anillo de electrodos se encuentra en un plano perpendicular a la dirección longitudinal del tubo, cuya dirección en este caso coincide con la dirección media del flujo másico.

- 15 El perfil de velocidad del flujo másico era de "tipo turbulento" con una velocidad de flujo máxima de 75 cm s⁻¹. La conductividad de fondo del material que fluía por el tubo era variable en el tiempo y, además, también había pequeños objetos resistivos no difusos arrastrados con el flujo. La conductividad de fondo se generó utilizando una simulación de FEM en una malla cilíndrica, por lo que se especificó una distribución de conductividad espacialmente homogénea y suavemente variable con el tiempo en el borde de entrada de flujo. La conductividad de fondo variaba en el intervalo de 0,29 a 0,57 Ω⁻¹ cm⁻¹.

- 20 Los objetos no difusos se agregaron a la conductividad de fondo simplemente creando elipsoides de diferentes dimensiones y posiciones en sección transversal y especificando una distribución de conductividad dentro del elipsoide. Los objetos elipsoidales se agregaron secuencialmente de uno en uno en el volumen objetivo. Las regiones apropiadas de la conductividad de fondo fueron luego reemplazadas por estas distribuciones de conductividad elipsoidal, y la velocidad de cambio en su posición fue especificada por la velocidad de flujo en el punto central del elipsoide.

- 25 Se generaron observaciones por EIT sin ruido con la simulación de FEM suponiendo que las mediciones pueden obtenerse instantáneamente. Se supuso que las impedancias de contacto dependían de la conductividad media en el dominio Ω , y todos los electrodos tenían una misma impedancia de contacto. El número de electrodos fue $N_{ej} = 16$ y se usó repetidamente un ciclo de ocho inyecciones, diferentes y opuestas, de corriente alterna de 2 mA. Se midieron las tensiones entre electrodos adyacentes y el número de mediciones en cada instante de tiempo fue $N_{meas} = 16$. El tiempo entre las observaciones subsiguientes fue de 10 milisegundos. El enfoque por FEM del modelo de electrodos completo y el modelo de convección-difusión se implementó en una malla densa que se visualiza en la Figura 1. El problema de estimación de estados se resolvió en una malla diferente, más pequeña, para evitar cometer crímenes inversos.

- 30 Se agregó ruido gaussiano $\varepsilon_{\tau} \sim N(0, \Gamma_{\varepsilon\tau})$ a los datos de medición sin ruido para simular los errores resultantes de la electrónica de medición y el ambiente. La covarianza del ruido de medición tenía la forma $\Gamma_{\varepsilon\tau} = \delta^2 I$, en donde $\delta = 0,005$.

- 35 Las impedancias de contacto de los electrodos fueron estimadas por separado, ya que todas fueron empleadas para las inyecciones de corriente.

- 40 Para la inicialización del IEKF, se calculó la "mejor estimación homogénea" $\theta_{bh} = [\sigma_{bh} z_{bh}]^T$, es decir, la estimación de mínimos cuadrados cuando tanto la distribución de conductividad como las impedancias de contacto están descritas con parámetros únicos. El IEKF se inicializó fijando a z_{bh} todas las impedancias de contacto en el vector de estado aumentado θ_{10} y todas las conductividades a σ_{bh} mientras que los términos que representan la parte no homogénea se fijaron a cero.

- 45 Las estimaciones del IEKF y el FIS se calcularon con las recursiones descritas anteriormente. En la Figura 2 se muestra una secuencia de estimaciones, así como la distribución de conductividad verdadera para un objeto elipsoidal arrastrado a través del volumen objetivo. La columna de la izquierda de la figura muestra la distribución de conductividad real ("verdadera"), la columna del medio las estimaciones del IEKF, y la columna de la derecha las estimaciones del FIS. Se puede ver que el objeto elipsoidal no puede ser reconstruido con el IEKF hasta que el objeto haya alcanzado la capa de electrodos, mientras que el objeto puede ser visto en cada estimación del FIS. Esta diferencia resulta de los diferentes conjuntos de datos utilizados en el IEKF y el FIS, como se explica a continuación.

En lo que respecta a las estimaciones del IEKF, dado que las mediciones por EIT son sensibles a la distribución de conductividad en la vecindad cercana del plano de electrodos, las mediciones no pueden ver las variaciones de conductividad que ocurran en otro lugar. Por lo tanto, las primeras indicaciones de los objetos se obtienen cuando el objeto ha alcanzado la capa de electrodos. Al pasar el plano de electrodos, el material que fluye es "escaneado" por las mediciones por EIT que proporcionan información sobre la distribución de conductividad cerca de la capa de electrodos.

En el FIS se calcula una estimación para cada instante de tiempo, utilizando también los datos relacionados con uno o más instantes de tiempo posteriores. Esto provoca un retraso entre las observaciones y las estimaciones, pero también mejora la calidad de las estimaciones. Especialmente en el lado corriente arriba de la capa de electrodos, las estimaciones son significativamente más precisas que las estimaciones del IEKF.

Con el fin de cuantificar la calidad de las estimaciones para la conductividad, se calcularon las normas relativas de los errores de estimación en cada instante de tiempo, y se muestran en la Figura 3. En las curvas de la Figura 3, cada pico denota un objeto elipsoidal que se mueve a través del segmento de tubería que forma el volumen objetivo. En otras palabras, en ambas estimaciones las normas de error relativas son más pequeñas en aquellos instantes de tiempo en los que los objetos elipsoidales no están en el segmento de tubería. Entonces también las precisiones de las estimaciones del IEKF y el FIS son cercanas entre sí con valores típicos de 3-4%. Cuando los objetos se encuentran dentro del segmento de tubería investigado, la norma de error relativa máxima de las estimaciones de IEKF y FIS es de aproximadamente 13-15% y 6-7%, respectivamente.

Además de la distribución de conductividad, también se deben estimar las impedancias de contacto. En la generación de datos, las impedancias de contacto de todos los electrodos fueron idénticas. Sin embargo, en el procesamiento de datos, los electrodos se describieron con valores independientes. La verdadera impedancia de contacto y los valores estimados aparecen en los gráficos de la Figura 4. El gráfico superior muestra las estimaciones del IEKF y el inferior las estimaciones del FIS. Las estimaciones siguen el valor real representado por la línea en negrita, pero los cambios temporales son bastante rápidos, especialmente en las estimaciones del IEKF.

Los resultados de simulación mostrados en las Figuras 2-4 y discutidos anteriormente demuestran claramente la viabilidad de la presente invención para formar imágenes tridimensionales de flujo másico. Como se discutió anteriormente, en las estimaciones del IEKF, los errores de estimación pueden ser bastante grandes en el lado corriente arriba de la capa de electrodos, ya que las observaciones no llevan información de esa región. Las observaciones actualizan las estimaciones en la región de la capa de electrodos y desde allí, es decir, en el lado corriente abajo de la capa de electrodos, la calidad de las estimaciones depende de la precisión del modelo de evolución. El problema con la precisión en la región corriente arriba puede abordarse con algoritmos más suaves en los que, en la estimación de estados del sistema en un instante de tiempo específico, también se utilicen datos de los instantes de tiempo posteriores.

ii) Aparato

El aparato de la Figura 5 comprende unos electrodos 3 dispuestos en una configuración tipo anular que rodea el volumen objetivo 2 de un flujo másico. El anillo de electrodos se encuentra en un plano 4 que es perpendicular con respecto a la dirección longitudinal del volumen objetivo, es decir, la dirección media del flujo másico. Los electrodos están conectados a una unidad 5 de procesamiento de señales que comprende la electrónica necesaria para generar y suministrar a los electrodos las señales de excitación, así como para medir las señales de respuesta entre los electrodos seleccionados. La generación y medición de señales, así como los acoplamientos entre la unidad 5 de procesamiento de señales y los electrodos 3 están controlados por un ordenador 6 con software(s) apropiado(s) instalado(s).

El aparato de la Figura 5 se usa y funciona de acuerdo con los principios del método descrito anteriormente en este documento. Por ejemplo, el ordenador 6 con su(s) software(s), junto con la unidad 5 de procesamiento de señales, forman los medios para determinar un modelo espacial de estados que define las relaciones entre la conductividad eléctrica, la tensión y la corriente en el volumen objetivo y que también define la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo; los medios para comparar las tensiones y las corrientes según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas; y los medios de modificación para modificar, según se requiera, el modelo espacial de estados para reducir las diferencias entre los resultados calculados y los medidos.

Notificación

Como queda claro para un experto en la técnica, la presente invención no está limitada a los ejemplos explicados anteriormente. Por el contrario, las realizaciones de la presente invención pueden variar natural y libremente dentro del alcance de las reivindicaciones. Particularmente, cualquier principio y práctica conocidos en este campo pueden ser utilizados en los detalles del modelo espacial de estados, así como en los métodos de cálculo reales.

REIVINDICACIONES

1. Un método para determinar la distribución tridimensional de la conductividad de un flujo másico en un volumen objetivo (2) tridimensional, comprendiendo el método las etapas de
 - 5 - recoger los valores de corriente o de tensión generados al suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo y medir la corriente o la tensión, correspondientemente, inducidas de ese modo en el volumen objetivo;
 - proporcionar un modelo espacial de estados que define las relaciones entre la conductividad eléctrica, la tensión y la corriente en el volumen objetivo (2), y la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo;
 - 10 - comparar las corrientes y/o las tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas;
 - modificar según se requiera el modelo espacial de estados para reducir las diferencias entre los resultados calculados y los medidos hasta lograr una consistencia predeterminada; y
 - 15 - determinar la distribución tridimensional de la conductividad del flujo másico en el volumen objetivo de acuerdo con el modelo espacial de estados modificado,
 caracterizado por que
 - los valores de corriente o tensión recogidos se seleccionan para que consistan en resultados de mediciones realizadas sustancialmente dentro de un plano (4); y
 - 20 - se proporciona el modelo espacial de estados para que comprenda el campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico dentro del volumen objetivo (2).
2. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo se determina en el modelo espacial de estados por medio de un modelo de convección-difusión.
3. Un método según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que, para las etapas de comparar las corrientes y/o tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas y modificar según se requiera el modelo espacial de estados, se genera un conjunto de datos que comprende, correspondientemente, valores de corriente y/o de tensión según el modelo espacial de estados, dentro del volumen objetivo (2).
4. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que la etapa de recoger valores de corriente o tensión comprende utilizar una pluralidad de electrodos (3) en una conexión de medición con el volumen objetivo, estando los electrodos colocados sustancialmente dentro de un plano, suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo entre dos de los electrodos (3), y medir la corriente o la tensión, correspondientemente, entre dos de los electrodos (3).
5. Un método según la reivindicación 4, caracterizado por que los electrodos (3) están colocados para establecer el plano (4), determinado por los mismos, sustancialmente perpendicular con respecto a la dirección de propagación media del flujo másico en el volumen objetivo (2).
6. Un método según la reivindicación 4 o 5, caracterizado por que los electrodos (3) están colocados en una configuración anular que rodea el volumen objetivo (2).
7. Un aparato (1) para determinar la distribución tridimensional de la conductividad de un flujo másico en un volumen objetivo (2) tridimensional, comprendiendo el aparato
 - 40 - unos medios (3, 5, 6) de recogida para recoger los valores de corriente o tensión generados al suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo y medir la corriente o la tensión, correspondientemente, inducida de ese modo en el volumen objetivo;
 - unos primeros medios (5, 6) de determinación para determinar un modelo espacial de estados que define las relaciones entre la conductividad eléctrica, la tensión y la corriente en el volumen objetivo (2) y la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo;
 - 45 - unos medios (5, 6) de comparación para comparar las corrientes y/o las tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas;
 - unos medios (5, 6) de modificación para modificar según se requiera el modelo espacial de estados para reducir las diferencias entre los resultados calculados y los medidos; y
 - 50 - unos segundos medios (5, 6) de determinación para determinar la distribución tridimensional de la conductividad del flujo másico en el volumen objetivo según el modelo espacial de estados modificado,

caracterizado por que

- los medios de recogida están dispuestos para seleccionar los valores de corriente o tensión recogidos para que consistan en los resultados de las mediciones realizadas sustancialmente dentro de un plano (4); y
 - los primeros medios (5, 6) de determinación están dispuestos para determinar el modelo espacial de estados de manera que comprenda el campo de flujo, dependiente del tiempo, del flujo másico dentro del volumen objetivo (2).
- 5
8. Un aparato (1) según la reivindicación 7, caracterizado por que los primeros medios (5, 6) de determinación están dispuestos para determinar la evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo, en el modelo espacial de estados, por medio de un modelo de convección-difusión.
- 10
9. Un aparato (1) según la reivindicación 7 u 8, caracterizado por que para comparar las corrientes y/o las tensiones según el modelo espacial de estados con las suministradas y las medidas y modificar según se requiera el modelo espacial de estados, el aparato comprende unos medios para generar un conjunto de datos que comprende, correspondientemente, los valores de corriente y/o de tensión según el modelo espacial de estados, dentro del volumen objetivo (2).
- 15
10. Un aparato (1) según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, caracterizado por que los medios de recogida comprenden unos electrodos (3) en una conexión de medición con el volumen objetivo, estando los electrodos ubicados sustancialmente dentro de un plano, y unos medios (5, 6) de suministro y medición para suministrar tensión alterna o corriente alterna al volumen objetivo entre dos de los electrodos (3) y medir la corriente o la tensión entre dos de los electrodos (3).
- 20
11. Un aparato (1) según la reivindicación 10, caracterizado por que los electrodos (3) están colocados para establecer el plano (4), determinado por los mismos, sustancialmente perpendicular con respecto a la dirección de propagación media del flujo másico en el volumen objetivo (2).
12. Un aparato (1) de acuerdo con la reivindicación 10 u 11, caracterizado por que los electrodos (3) están colocados en una configuración anular que rodea el volumen objetivo (2).
- 25
13. Un programa informático que comprende un código de programa dispuesto para realizar, cuando se ejecuta en un procesador de datos, las etapas de método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.

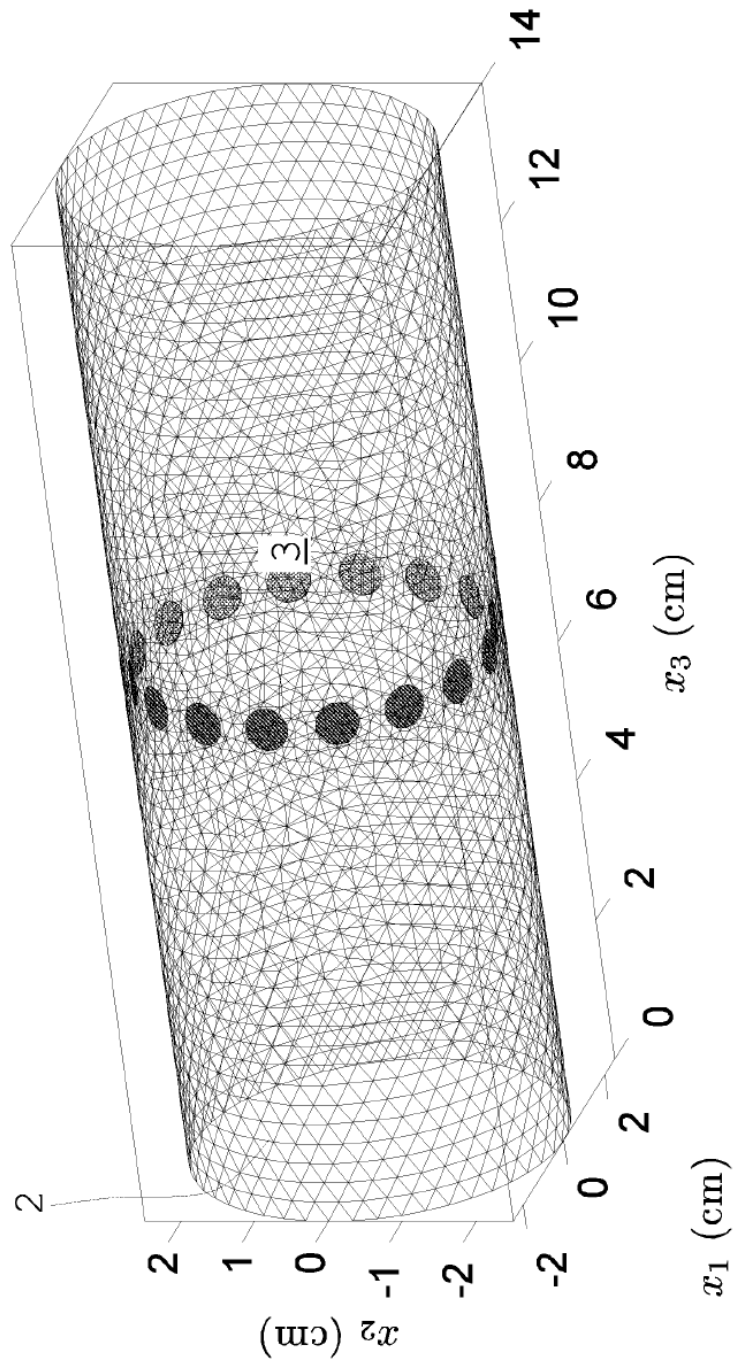
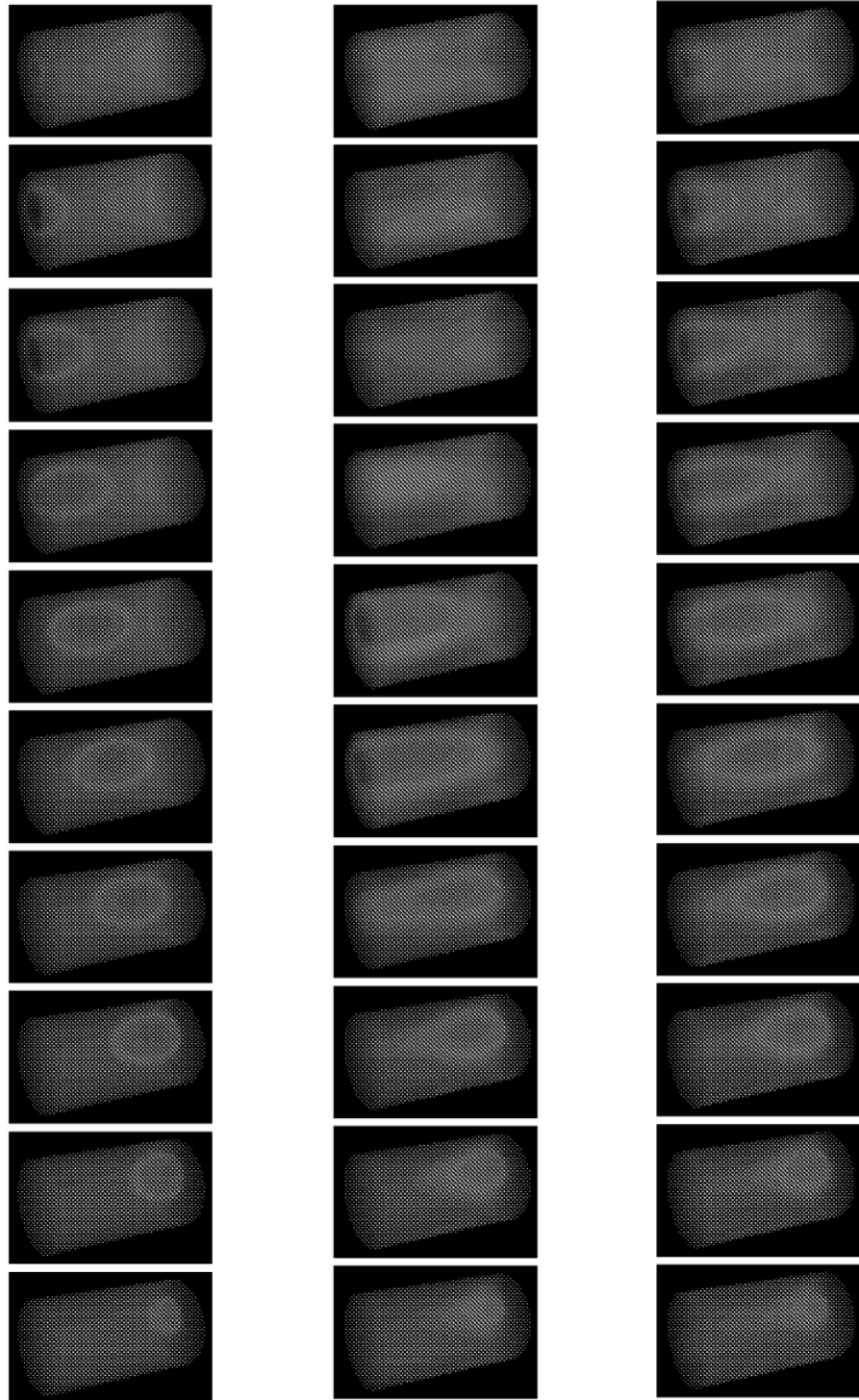


Fig. 1



VERDADERA

IEKF

FIS

Fig. 2

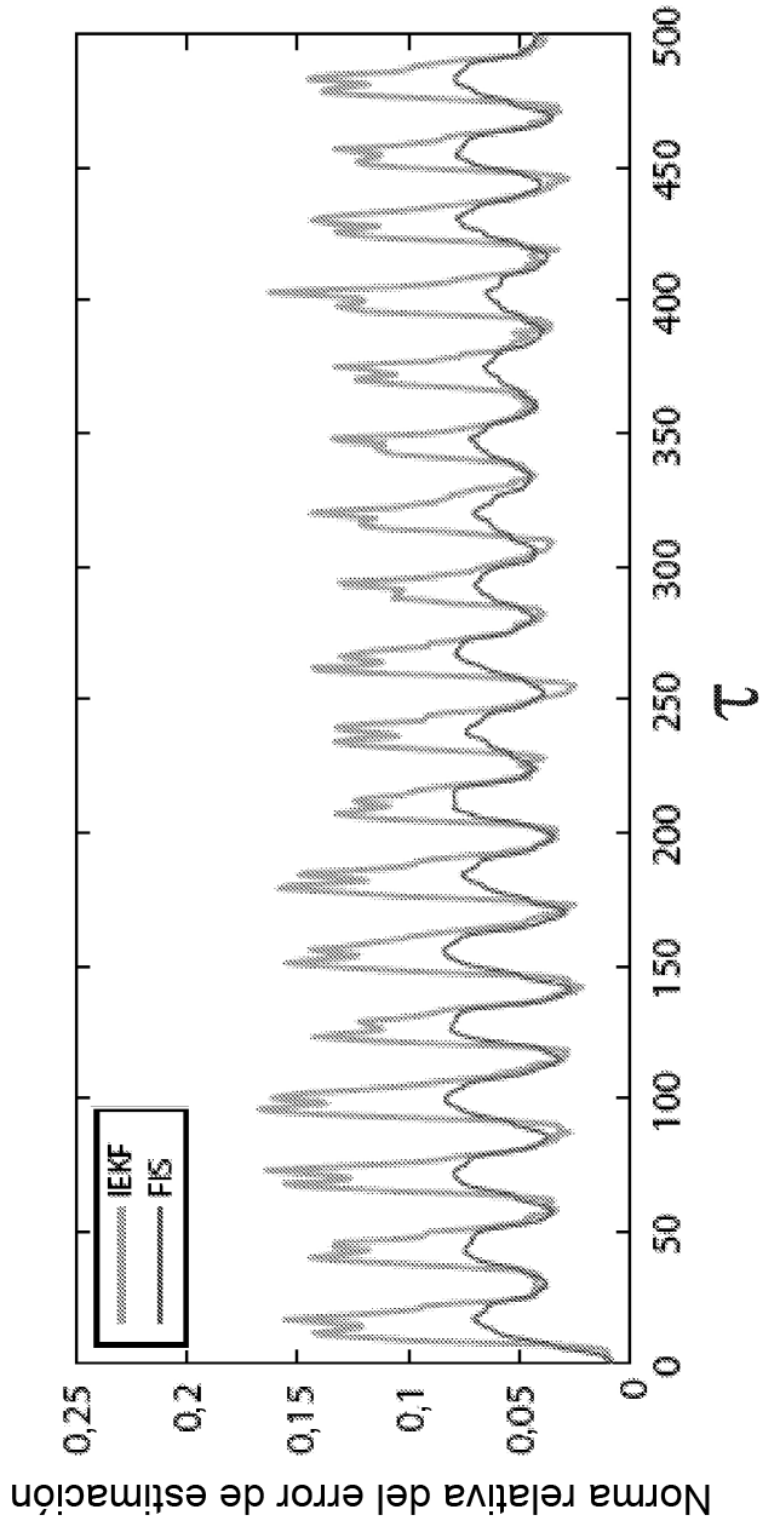


Fig. 3

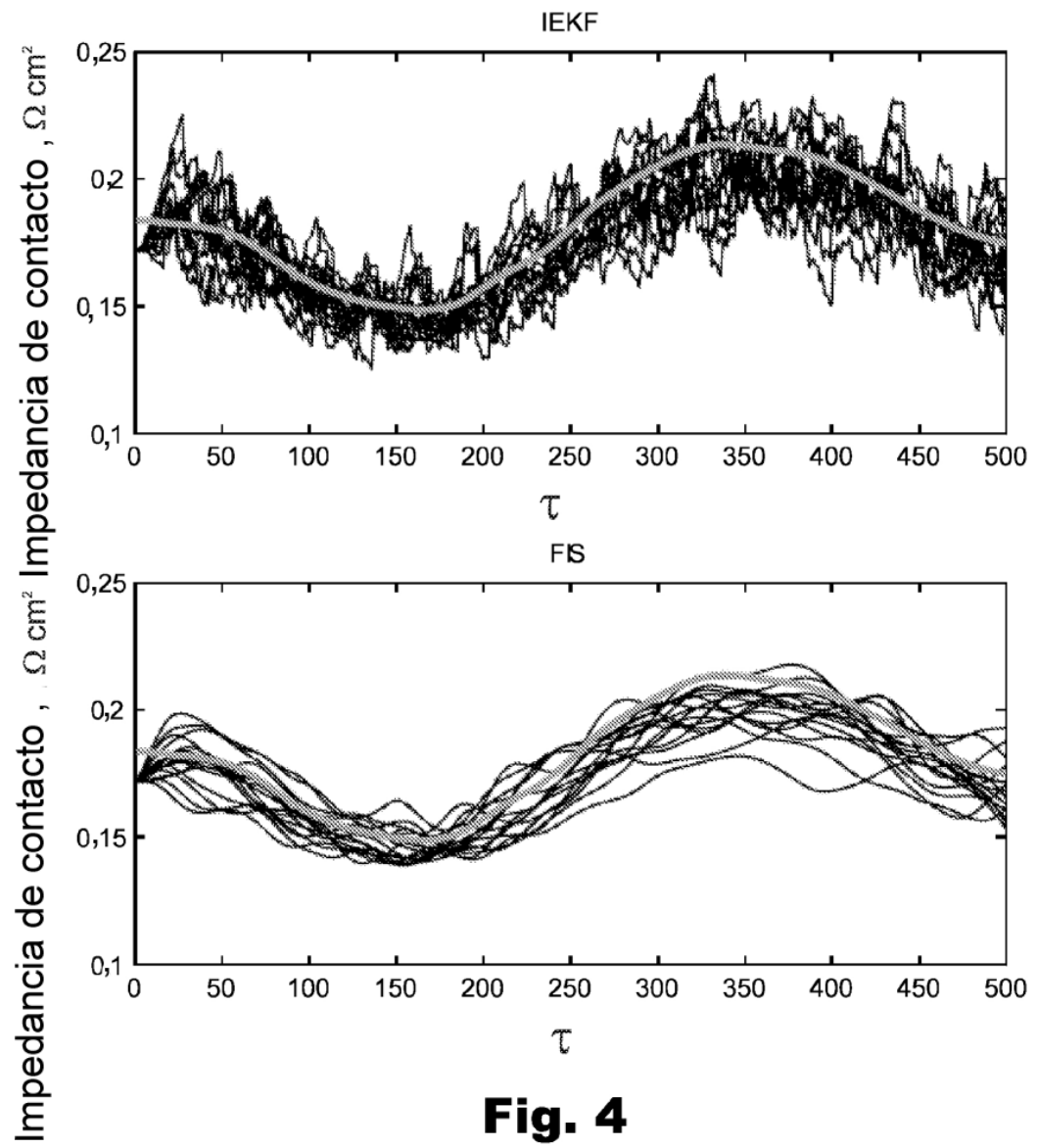


Fig. 4

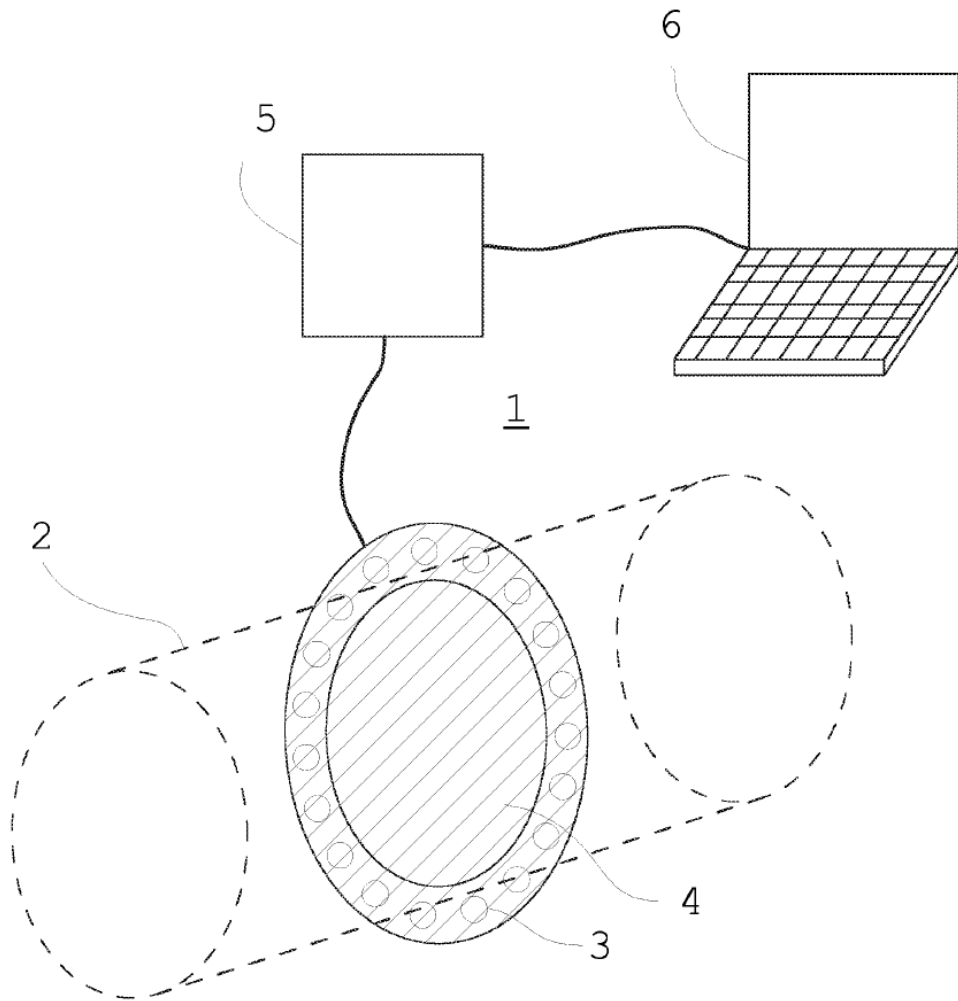


Fig. 5