

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 810 934**

51 Int. Cl.:

G01P 5/08 (2006.01)

G01N 27/06 (2006.01)

G01N 27/22 (2006.01)

G01F 1/58 (2006.01)

G01N 11/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.11.2016 PCT/GB2016/053397**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.05.2017 WO17077293**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.11.2016 E 16793976 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 3371608**

54 Título: **Aparato para medir las propiedades reológicas y velocidades de un fluido**

30 Prioridad:

02.11.2015 GB 201519363

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

09.03.2021

73 Titular/es:

**INDUSTRIAL TOMOGRAPHY SYSTEMS PLC
(100.0%)
First Floor - Suite 101 Sunlight House 85 Quay
Street
Manchester M3 3JZ, GB**

72 Inventor/es:

**PRIMROSE, KENNETH;
QIU, CHANGHUA y
WEI, KENT**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 810 934 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

Aparato para medir las propiedades reológicas y velocidades de un fluido

La presente invención se refiere a un aparato de medición.

5 Más particularmente, pero no exclusivamente, la invención se refiere a un aparato de medición para medir la velocidad de un material que fluye dentro de una tubería o recipiente.

10 La reología se refiere al estudio del flujo de materia en respuesta a una fuerza aplicada. En general, la materia estudiada por la reología está en estado líquido, sin embargo, también se pueden estudiar mezclas de líquidos y sólidos (por ejemplo, suspensiones). La reología permite comprender mejor los efectos de la viscosidad en el flujo de materia en aplicaciones industriales. Por ejemplo, el transporte de material en tuberías, o la mezcla de material en un recipiente, son sistemas complejos en los que la viscosidad del material en cuestión conduce a patrones de flujo complicados en todo el material, y en particular en las paredes de la tubería o recipiente.

15 La tomografía se refiere al uso de alguna forma de onda penetrante para representar una región de interés. Generalmente se construye una imagen mediante la combinación de una pluralidad de secciones de imagen. La tomografía se aplica a menudo a procesos industriales, y se puede usar para estudiar la reología. Las ondas penetrantes utilizadas en la tomografía pueden ser generadas por campos eléctricos o magnéticos. La tomografía de resistividad eléctrica (ERT, por sus siglas en inglés) utiliza electrodos colocados alrededor de la región de interés para monitorizar la resistividad dentro de la región de interés, y se puede usar, por ejemplo, para monitorizar características de mezclas de fluidos conductores en tuberías. La tomografía de capacitancia eléctrica (ECT, por sus siglas en inglés) también utiliza electrodos colocados alrededor de la región de interés, pero monitoriza la permitividad eléctrica dentro del material de interés. De este modo, la ECT se puede usar para distinguir entre materiales que tienen diferentes permitividades eléctricas.

20 Los aparatos y métodos de tomografía conocidos generalmente disponen de un anillo de electrodos espaciados alrededor de la periferia de un cuerpo que ha de ser representado. Se excitan varias combinaciones de electrodos, y se detectan señales de aquellos electrodos que se excitan o de otros electrodos, dependiendo del esquema de excitación utilizado. En la técnica se conoce una variedad de esquemas de excitación y detección. Tanto la tomografía de resistividad como la de capacitancia se pueden usar en una disposición de este tipo.

25 En aparatos conocidos, en los que está previsto un anillo de electrodos alrededor de la periferia de un cuerpo, la información detallada relacionada con la reología del material dentro del cuerpo generalmente solo está disponible en la región central del cuerpo y en el plano del anillo de electrodos. Sin embargo, por regla general no hay disponible información detallada sobre la distribución de material en todo el cuerpo, y en particular en las regiones próximas a las paredes del cuerpo. Además, cuando están previstos anillos de electrodos, cada anillo generalmente solo proporciona información sobre el material en el plano de ese anillo, en lugar de proporcionar información sobre la distribución de material a lo largo del cuerpo.

30 El documento EP 1607739 A1 describe un sensor capacitivo que se basa en electrodos configurables. La distribución de las líneas de campo eléctrico de un condensador de sensor se modifica mediante diferentes conexiones eléctricas de los electrodos o subunidades o grupos de electrodos y variando las conexiones eléctricas a los circuitos de lectura.

35 El documento US 2007/186679 A1 se refiere a un método y un dispositivo para determinar los parámetros de un flujo fluctuante de un fluido en una tubería, en donde están previstos al menos tres electrodos colocados a una distancia entre sí en la dirección del flujo en la periferia del flujo, en donde se suministran señales de tensión alterna a una primera disposición de electrodos de transmisión aguas arriba y a una segunda disposición de electrodos de transmisión aguas abajo, y las señales de recepción generadas por la corriente de desplazamiento se detectan en una disposición de electrodos de recepción situada entre los electrodos de transmisión y se someten a una correlación cruzada de tiempo discreto.

40 El documento WO 2015/118332 describe un dispositivo de medición que tiene un cuerpo que define una periferia externa y comprende un conjunto ordenado bidimensional de electrodos dispuestos generalmente paralelos a dicha periferia externa del cuerpo, una fuente de excitación dispuesta para excitar al menos uno de dichos electrodos, y un monitor dispuesto para medir un parámetro eléctrico de al menos uno de dichos electrodos.

45 El documento EP 2343541 A1 describe un sensor (20) que tiene un primer grupo de electrodos (22) que son sensibles a un intervalo de concentración de sustancia diferente al de un segundo grupo de electrodos (24). El sensor (20) se puede fabricar en un proceso CMOS estándar y es sensible a un intervalo amplio de concentración de sustancias, desde unas pocas partes por millón hasta un intervalo porcentual.

50 Un objeto de la presente invención consiste en proporcionar un aparato que supere uno o más de los problemas asociados con aparatos de tomografía conocidos, descritos más arriba o de otro modo.

De acuerdo con la invención se proporciona un aparato de medición según la reivindicación 1.

Más abajo se describen, solo con fines ilustrativos, otros aparatos de medición que no comprenden todas las características del aparato de la reivindicación 1 y que no forman parte de la presente invención.

5 También se describe un aparato de medición que comprende: una pluralidad de primeros electrodos, estando separados cada uno de los primeros electrodos por al menos una primera separación predeterminada; una pluralidad de segundos electrodos, estando separados cada uno de los segundos electrodos por al menos una segunda separación predeterminada menor que la primera separación predeterminada; una fuente de excitación dispuesta para excitar al menos uno de dichos primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos primeros electrodos, y para excitar al menos uno de dichos segundos electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos segundos electrodos; un monitor dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos primeros electrodos y para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos segundos electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos segundos electrodos; y un controlador dispuesto para generar datos indicativos de una propiedad de un material dentro de una primera región que se extiende una primera distancia desde los primeros electrodos, y para generar datos indicativos de una propiedad de un material dentro de una segunda región que se extiende una segunda distancia, menor que primera distancia, desde los segundos electrodos, sobre la base de dichos parámetros eléctricos monitorizados.

20 El uso de una pluralidad de primeros electrodos que permite realizar mediciones profundas en el material, y una pluralidad de segundos electrodos que permite realizar mediciones con una resolución más alta, pero a relativamente poca profundidad, permite obtener información detallada relacionada con la distribución del material. La pluralidad de primeros electrodos se puede designar como conjunto ordenado de campo lejano, mientras que la pluralidad de segundos electrodos se puede designar como conjunto ordenado de campo cercano.

25 El aparato de medición según la invención no requiere aparatos dispuestos para generar un campo magnético para realizar las mediciones. Más bien, la fuente de excitación excita al menos uno de los primeros electrodos para establecer un campo eléctrico entre al menos un par de los primeros electrodos, y la fuente de excitación excita al menos uno de los segundos electrodos para establecer un campo eléctrico entre al menos un par de los segundos electrodos. Es decir, los mismos electrodos (o al menos electrodos dentro de los mismos conjuntos ordenados) se usan tanto para generar un campo eléctrico como para realizar mediciones relacionadas con el campo eléctrico generado.

30 La segunda separación predeterminada puede ser menor que la mitad de la primera separación predeterminada. La segunda distancia puede ser menor que la mitad de la primera distancia.

La pluralidad de primeros electrodos puede comprender un conjunto ordenado de primeros electrodos. La pluralidad de segundos electrodos puede comprender un conjunto ordenado de segundos electrodos. El conjunto ordenado de electrodos puede ser un conjunto ordenado lineal.

La propiedad del material puede ser una velocidad del material.

35 El aparato de medición puede comprender además una fuente de alteración, estando dispuesta la fuente de alteración para introducir una alteración en un flujo de material. El controlador puede estar dispuesto para detectar un efecto de dicha alteración.

La fuente de alteración puede consistir en un calentador.

El aparato de medición puede comprender además una segunda pluralidad de primeros electrodos.

40 El controlador puede estar dispuesto para generar datos indicativos de una relación entre un parámetro eléctrico monitorizado en al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos, y un parámetro eléctrico monitorizado en al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos.

45 El controlador puede estar configurado para determinar una relación entre el parámetro monitorizado en al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos y el parámetro monitorizado en al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos. Los datos indicativos de una propiedad del material se pueden basar en la relación determinada.

50 El aparato de medición puede comprender además: una pluralidad de terceros electrodos, estando cada uno de los terceros electrodos separados por al menos una tercera separación predeterminada. La tercera separación predeterminada puede ser menor que la primera separación predeterminada y mayor que la segunda separación predeterminada. La fuente de excitación puede estar dispuesta además para excitar al menos uno de dichos terceros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos terceros electrodos. El monitor puede estar dispuesto además para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos terceros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos terceros electrodos. El controlador puede estar dispuesto además para generar datos indicativos de una propiedad de un material dentro de una tercera región que

se extiende una tercera distancia desde los terceros electrodos sobre la base de los parámetros eléctricos monitorizados, siendo la tercera distancia menor que la primera distancia y mayor que la segunda distancia.

La pluralidad de primeros electrodos puede detectar material a una profundidad mayor que la pluralidad de terceros electrodos, que a su vez puede detectar material a una profundidad mayor que la pluralidad de segundos electrodos. Es decir, la profundidad del material de la pluralidad de primeros electrodos que influye significativamente en la medición realizada por la pluralidad de primeros electrodos es mayor que la profundidad del material de la pluralidad de terceros electrodos que influye significativamente en las mediciones realizadas por la pluralidad de terceros electrodos, que a su vez es mayor que la profundidad del material de la pluralidad de segundos electrodos que influye significativamente en las mediciones realizadas por la pluralidad de segundos electrodos. Por lo tanto, las respectivas pluralidades de primeros, segundos y terceros electrodos tienen diferentes sensibilidades de profundidad respectivas. El uso de las pluralidades de primeros, segundos y terceros electrodos permite la generación de datos indicativos de una propiedad del material dentro de regiones que se extienden diferentes distancias desde los electrodos, lo que a su vez permite que el aparato de medición genere resultados más precisos y fiables.

El aparato de medición puede comprender además una pluralidad adicional de primeros electrodos, que están separados de la pluralidad de primeros electrodos en una dirección de flujo del material. Cada uno de la pluralidad adicional de primeros electrodos puede estar separado de los otros por al menos la primera separación predeterminada.

La fuente de excitación puede estar dispuesta para excitar adicionalmente al menos uno de dicha pluralidad adicional de primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad adicional de primeros electrodos. El monitor puede estar dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dicha pluralidad adicional de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad adicional de primeros electrodos. El controlador puede estar dispuesto para determinar una relación entre el parámetro monitorizado en al menos uno de la pluralidad de primeros electrodos y el parámetro monitorizado en al menos uno de la pluralidad adicional de primeros electrodos, y generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una región entre la pluralidad de primeros electrodos y la pluralidad adicional de primeros electrodos sobre la base de dicha relación determinada.

El aparato de medición puede comprender además una pluralidad adicional de segundos electrodos, que están separados de la pluralidad de segundos electrodos en una dirección de flujo del material. Cada uno de la pluralidad adicional de segundos electrodos puede estar separado de los otros por al menos la segunda separación predeterminada.

La fuente de excitación puede estar dispuesta para excitar adicionalmente al menos uno de dicha pluralidad adicional de segundos electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad adicional de segundos electrodos. El controlador puede estar dispuesto para determinar una relación entre un parámetro eléctrico monitorizado por el monitor en al menos uno de la pluralidad de segundos electrodos y un parámetro eléctrico monitorizado por el monitor en al menos uno de la pluralidad adicional de segundos electrodos, y generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una región entre la pluralidad de segundos electrodos y la pluralidad adicional de segundos electrodos sobre la base de dicha relación determinada.

El aparato de medición puede comprender además una pluralidad adicional de terceros electrodos, que están separados de la pluralidad de terceros electrodos en una dirección de flujo del material. Cada uno de la pluralidad adicional de terceros electrodos puede estar separado de los otros por al menos la tercera separación predeterminada.

La fuente de excitación puede estar dispuesta para excitar adicionalmente al menos uno de dicha pluralidad adicional de terceros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad adicional de terceros electrodos. El controlador puede estar dispuesto para determinar una relación entre un parámetro eléctrico monitorizado por el monitor en al menos uno de la pluralidad de terceros electrodos y un parámetro eléctrico monitorizado por el monitor en al menos uno de la pluralidad adicional de terceros electrodos, y generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una región entre la pluralidad de terceros electrodos y la pluralidad adicional de terceros electrodos sobre la base de dicha relación determinada.

Una o más de la pluralidad de primeros electrodos, la pluralidad de segundos electrodos, la pluralidad de terceros electrodos, la pluralidad adicional de primeros electrodos, la pluralidad adicional de segundos electrodos y la pluralidad adicional de terceros electrodos pueden estar dispuestas a lo largo de una dirección de flujo del material. Es decir, cada uno de los electrodos dentro de una pluralidad de electrodos particular (que puede ser, por ejemplo, un conjunto ordenado lineal) puede estar separado de cada uno de los otros electrodos dentro de esa pluralidad de electrodos particular en la dirección del flujo del material.

Alternativamente, una o más de la pluralidad de primeros electrodos, la pluralidad de segundos electrodos, la pluralidad de terceros electrodos, la pluralidad adicional de primeros electrodos, la pluralidad adicional de segundos electrodos y la pluralidad adicional de terceros electrodos pueden estar dispuestas en una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección de flujo del material. Es decir, cada uno de los electrodos dentro de una pluralidad de

electrodos particular puede estar separado de cada uno de los otros electrodos dentro de esa pluralidad de electrodos particular en una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo del material.

5 Una o más de la pluralidad de primeros electrodos, la pluralidad de segundos electrodos, la pluralidad de terceros electrodos, la pluralidad adicional de primeros electrodos, la pluralidad adicional de segundos electrodos y la pluralidad adicional de terceros electrodos pueden estar dispuestas a lo largo de un recorrido helicoidal, donde un eje del recorrido helicoidal es paralelo a la dirección del flujo del material.

10 También se describe un aparato de medición que comprende: una primera pluralidad de primeros electrodos que se extienden en una dirección de flujo de un material; una segunda pluralidad de primeros electrodos que se extienden en una dirección de flujo de un material, estando separada la segunda pluralidad de primeros electrodos de la primera pluralidad de primeros electrodos en una dirección de flujo de un material; una fuente de excitación dispuesta para excitar al menos uno de dicha primera pluralidad de primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha primera pluralidad de primeros electrodos, y excitar al menos uno de dicha segunda pluralidad de electrodos primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos; un monitor dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dicha primera pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha primera pluralidad de primeros electrodos y para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos; y un controlador dispuesto para determinar una relación entre el parámetro monitorizado en al menos uno de la primera pluralidad de primeros electrodos y el parámetro monitorizado en al menos uno de la segunda pluralidad de primeros electrodos, y generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una región entre las primeras y segundas pluralidades de primeros electrodos sobre la base de dicha relación determinada.

25 El uso de primeras y segundas pluralidades de primeros electrodos que se extienden en la dirección del flujo del material permite realizar mediciones en las que los datos adquiridos proporcionan un plano de detección que es sustancialmente paralelo a una dirección del flujo. Por lo tanto, al comparar los datos medidos en diferentes momentos y en diferentes posiciones en la dirección del flujo, es posible determinar información indicativa de la distribución del flujo de material, tal como, por ejemplo, la velocidad de flujo de material entre la primera y la segunda pluralidades de primeros electrodos. Además, la alineación del plano de detección con la dirección del flujo (en lugar de ser perpendicular a la dirección del flujo) permite obtener información adicional sobre la distribución del flujo. Es decir, diferentes subregiones dentro del plano de detección a lo largo de la dirección del flujo pueden corresponder a posiciones a lo largo de un recorrido de flujo para una parte particular de material a medida que se mueve en la dirección del flujo. Como tal, mediante el uso de una pluralidad de primeros electrodos que están distribuidos a lo largo de la dirección de flujo de un material, y realizando mediciones en una pluralidad de momentos diferentes, es posible derivar información indicativa de la velocidad de movimiento del material adyacente a las pluralidades de primeros electrodos, y también la diferente velocidad de movimiento del material en diferentes posiciones alrededor de las pluralidades de primeros electrodos.

La región entre la primera y la segunda pluralidades de primeros electrodos puede comprender una región que se extiende una primera distancia desde las primeras y segundas pluralidades de primeros electrodos.

40 Cada uno de la primera pluralidad de primeros electrodos puede estar separado por al menos una primera separación predeterminada. Cada uno de la segunda pluralidad de primeros electrodos puede estar separado por al menos la primera separación predeterminada.

El aparato de medición puede comprender además una pluralidad de segundos electrodos y una pluralidad adicional de segundos electrodos, estando la pluralidad adicional de segundos electrodos separada de la pluralidad de segundos electrodos en la dirección del flujo del material.

45 Cada uno de la pluralidad de segundos electrodos puede estar separado por al menos una segunda separación predeterminada. Cada uno de la pluralidad adicional de segundos electrodos puede estar separado por al menos la segunda separación predeterminada. La segunda separación predeterminada puede ser menor que la primera separación predeterminada. La segunda separación predeterminada puede ser menor que la mitad de la primera separación predeterminada.

50 La pluralidad y la pluralidad adicional de segundos electrodos pueden estar separadas de la primera y la segunda pluralidades de primeros electrodos en la dirección del flujo del material.

55 El controlador puede estar dispuesto para generar datos indicativos de una relación entre un parámetro eléctrico monitorizado en al menos uno de dicha pluralidad de segundos electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de segundos electrodos y un parámetro eléctrico monitorizado en al menos uno de dicha pluralidad adicional de segundos electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad adicional de segundos electrodos.

El controlador puede estar configurado para determinar una segunda relación entre el parámetro monitorizado en al menos uno de dicha pluralidad de segundos electrodos y el parámetro monitorizado en al menos uno de dicha

pluralidad adicional de segundos electrodos, y generar datos indicativos de una segunda propiedad del material dentro de una región entre la pluralidad y la pluralidad adicional de segundos electrodos sobre la base de dicha segunda relación determinada.

5 La región entre la pluralidad y la pluralidad adicional de segundos electrodos puede comprender una región que se extiende una segunda distancia desde la pluralidad y la pluralidad adicional de segundos electrodos, siendo la segunda distancia menor que la primera distancia. La segunda distancia puede ser menor que la mitad de la primera distancia.

La pluralidad de primeros electrodos puede comprender un conjunto ordenado de electrodos. La pluralidad adicional de primeros electrodos puede comprender un conjunto ordenado de electrodos. Uno o más de los conjuntos ordenados de electrodos puede ser un conjunto ordenado lineal.

10 La pluralidad de segundos electrodos puede comprender un conjunto ordenado de segundos electrodos. La pluralidad adicional de segundos electrodos puede comprender un conjunto ordenado de segundos electrodos. Uno o más de los conjuntos ordenados de segundos electrodos puede ser un conjunto ordenado lineal.

La propiedad del material puede ser una velocidad del material. La segunda propiedad del material puede ser una velocidad del material.

15 El aparato de medición puede comprender además una fuente de alteración, estando dispuesta la fuente de alteración para introducir una alteración en un flujo de material, y estando dispuesto el controlador para detectar un efecto de dicha alteración. La fuente de alteración puede comprender un calentador.

El controlador puede estar dispuesto para determinar una distribución de velocidad del material dentro de la región entre la primera y segunda pluralidades de primeros electrodos sobre la base de dicha relación determinada.

20 El controlador puede estar dispuesto para determinar una distribución de velocidad del material dentro de la región entre la pluralidad y la pluralidad adicional de segundos electrodos sobre la base de dicha segunda relación determinada.

25 El controlador puede estar dispuesto además para obtener datos de referencia indicativos de una propiedad de referencia de un material, y para determinar una relación entre dichos datos indicativos de la propiedad del material y los datos de referencia.

El controlador puede estar dispuesto para realizar una comparación entre dicha relación determinada y un criterio predeterminado.

Los datos de referencia pueden comprender una distribución de velocidad modelo. Los datos de referencia pueden ser datos obtenidos por mediciones previas o basados en modelos físicos.

30 El controlador puede estar dispuesto para generar datos indicativos de una viscosidad del material. Los datos indicativos de una viscosidad del material pueden consistir en una viscosidad del material. Los datos indicativos de una viscosidad del material pueden consistir en datos que indican un cambio en la viscosidad del material y/o datos que indican una viscosidad relativa del material.

35 El controlador puede estar dispuesto para comparar los datos indicativos de una viscosidad del material con un perfil de viscosidad de referencia que corresponde a una característica de material predeterminada. El controlador puede estar dispuesto para determinar si una característica del material es igual a la característica de material predeterminada. La característica de material predeterminada puede ser una fracción de masa predeterminada del material.

40 El controlador puede estar dispuesto para generar datos indicativos de la reología del material. Los datos indicativos de la reología del material pueden comprender un parámetro reológico, tal como, por ejemplo, un parámetro reológico representativo de la viscosidad efectiva del material.

El controlador puede estar dispuesto para generar datos indicativos de la reología de fluidos newtonianos y/o fluidos no newtonianos.

45 El controlador puede estar dispuesto para determinar un perfil de velocidad de flujo del material basado en los datos generados usando un algoritmo de ajuste.

El algoritmo de ajuste puede ser un algoritmo de Gauss-Newton. El algoritmo de Gauss-Newton puede estar provisto de datos indicativos de relaciones entre propiedades del material. Por ejemplo, los datos indicativos de una relación entre diversas propiedades de fluido pueden comprender modelos de flujo de fluido tales como, por ejemplo, modelo de fluido newtoniano, modelo de fluido de ley de potencia y modelo de fluido de Herschel-Bulkley.

50 También se describe un aparato de medición que comprende: una pluralidad de electrodos que se extienden en una dirección de flujo de un material; una fuente de excitación dispuesta para excitar al menos uno de dicha pluralidad de electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad de electrodos

durante un primer período de tiempo, y para excitar al menos uno de dicha pluralidad de electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad de electrodos durante un segundo período de tiempo; y un monitor dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dicha pluralidad de electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de electrodos durante el primer período de tiempo, y en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de electrodos durante el segundo período de tiempo; y un controlador dispuesto para determinar una relación entre el parámetro monitorizado en al menos uno de la pluralidad de electrodos durante el primer período de tiempo y durante el segundo período de tiempo, y para generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una región que se extiende desde la pluralidad de electrodos sobre la base de dicha relación determinada.

El uso de una pluralidad de electrodos que se extienden en la dirección del flujo del material permite realizar mediciones en las que los datos adquiridos proporcionan un plano de detección que es sustancialmente paralelo a una dirección del flujo. Por lo tanto, al comparar los datos medidos en diferentes períodos de tiempo y en diferentes posiciones en la dirección del flujo (es decir, en diferentes subregiones dentro del plano de detección), es posible determinar información indicativa de la distribución del flujo de material, tal como, por ejemplo, la velocidad de flujo del material más allá de la pluralidad de electrodos. Diferentes subregiones dentro del plano de detección a lo largo de la dirección del flujo pueden corresponder a posiciones a lo largo de un recorrido de flujo para una parte particular de material a medida que se mueve en la dirección del flujo. Como tal, al usar una pluralidad de electrodos que están distribuidos a lo largo de la dirección del flujo de un material (ya sea en un solo conjunto ordenado o en una pluralidad de conjuntos ordenados), y al realizar mediciones en una pluralidad de momentos diferentes, es posible derivar información indicativa de la velocidad de movimiento del material adyacente a las pluralidades de electrodos, y también la diferente velocidad de movimiento del material en diferentes posiciones alrededor de la pluralidad de electrodos.

Las características descritas en combinación con el primer aspecto de la invención se pueden usar en combinación con otros aparatos descritos en la presente memoria.

También se describe un aparato de medición que comprende: una pluralidad de primeros electrodos; una fuente de excitación dispuesta para excitar al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad de primeros electrodos; un monitor dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos; y un controlador. El controlador puede estar dispuesto para generar una pluralidad de elementos de datos basados en los parámetros eléctricos monitorizados, siendo cada elemento de datos indicativo de una propiedad de un material dentro de una subregión respectiva dentro de dicho aparato, en donde cada una de la pluralidad de subregiones está asociada con una profundidad nominal predeterminada respectiva que se extiende dentro del aparato de medición desde la pluralidad de primeros electrodos. El controlador puede estar dispuesto además para generar una pluralidad de elementos de datos de profundidad, estando asociado cada uno de la pluralidad de elementos de datos de profundidad con uno respectivo de la pluralidad de elementos de datos indicativos de una propiedad de un material.

Dicha generación de cada uno de dicha pluralidad de elementos de datos de profundidad se puede basar en una profundidad nominal predeterminada respectiva y uno de una pluralidad respectiva de factores de profundidad, estando cada uno de la pluralidad de factores de profundidad asociado con una respectiva de la pluralidad de subregiones dentro de dicho aparato.

Por lo tanto, la pluralidad de factores de profundidad se puede utilizar para ajustar datos (tales como, por ejemplo, datos de velocidad) generados por el controlador sobre la base de dichos parámetros eléctricos monitorizados con el fin de asegurar que los datos indicativos de una propiedad del material están asociados con una profundidad correcta que se extiende desde la pluralidad de primeros electrodos hacia el interior del aparato de medición.

El uso de una pluralidad de factores de profundidad permite aplicar una escala no lineal a los datos obtenidos. Es decir, en lugar de aplicar un factor de escala uniforme a todos los datos de medición, se pueden aplicar diferentes factores de profundidad según corresponda en función de la ubicación de la subregión. Se ha observado que la profundidad de penetración del campo de excitación en el material es menor de lo esperado, lo que da como resultado mediciones que se interpretan como indicativas de material más alejado de la superficie del sensor de lo que es correcto. El uso de una pluralidad de factores de profundidad permite corregir dichos errores, sin influir indebidamente en la profundidad aparente de las mediciones relacionadas con diferentes subregiones. Es decir, se puede aplicar un factor de escala de profundidad apropiado a cada subregión.

La profundidad nominal predeterminada asociada con cada una de la pluralidad de subregiones que se extienden dentro del aparato de medición se puede determinar sobre la base de una distribución esperada de dicho campo eléctrico dentro de dicho material. Las subregiones pueden, por ejemplo, estar distribuidas de modo que se extienden en una dirección paralela a la pared de la tubería. Cada subregión puede estar asociada con una distancia nominal predeterminada (o intervalo de distancias) desde la pared de la tubería (es decir, una profundidad nominal predeterminada dentro de la tubería).

El controlador está dispuesto para generar cada uno de los elementos de datos de profundidad sobre la base de datos geométricos.

Los datos geométricos pueden estar asociados con la pluralidad de primeros electrodos. Dichos datos geométricos asociados con la primera pluralidad de primeros electrodos pueden comprender una longitud de dicha primera pluralidad de primeros electrodos.

5 Cada uno de la pluralidad de elementos de datos de profundidad puede ser proporcional a una longitud de la pluralidad de primeros electrodos.

Por la longitud de la primera pluralidad de primeros electrodos se entiende una distancia, en una dirección en la que se extiende la pluralidad de primeros electrodos, entre los electrodos que se excitan y monitorizan para generar datos indicativos de dicha propiedad de dicho material.

10 Cada uno de la pluralidad de elementos de datos de profundidad se puede generar sobre la base de una relación entre dicha profundidad nominal predeterminada respectiva y dicho factor de profundidad respectivo de la pluralidad de factores de profundidad.

Cada uno de la pluralidad de elementos de datos de profundidad se puede generar dividiendo dicha profundidad nominal predeterminada respectiva por dicho factor de profundidad respectivo de la pluralidad de factores de profundidad.

15 Un primero de la pluralidad de factores de profundidad puede corresponder a una primera de dicha pluralidad de subregiones, y un segundo de la pluralidad de factores de profundidad puede corresponder a una segunda de dicha pluralidad de subregiones. Dicha primera subregión de dicha pluralidad de subregiones puede estar más alejada de la primera pluralidad de electrodos que dicha segunda subregión de dicha pluralidad de subregiones. Dicho primer factor de profundidad de la pluralidad de factores de profundidad puede ser mayor que dicho segundo factor de profundidad de la pluralidad de factores de profundidad.

20

Alternativamente, cada uno de la pluralidad de elementos de datos de profundidad se puede generar multiplicando dicha profundidad nominal predeterminada respectiva por dicho factor de profundidad respectivo de la pluralidad de factores de profundidad. Un primero de la pluralidad de factores de profundidad puede corresponder a una primera de dicha pluralidad de subregiones y un segundo de la pluralidad de factores de profundidad puede corresponder a una segunda de dicha pluralidad de subregiones. Dicha primera subregión de dicha pluralidad de subregiones puede estar más alejada de la primera pluralidad de electrodos que dicha segunda subregión de dicha pluralidad de subregiones. Dicho primer factor de profundidad de la pluralidad de factores de profundidad puede ser menor que dicho segundo factor de profundidad de la pluralidad de factores de profundidad.

25

30 El controlador puede estar dispuesto para generar dicha pluralidad de factores de profundidad sobre la base de datos indicativos de una propiedad de un material de referencia.

Dichos datos indicativos de una propiedad del material de referencia se pueden obtener mediante dicho aparato de medición. Los datos indicativos de una propiedad de un material de referencia se pueden obtener sobre la base de mediciones realizadas por el aparato de medición. Los datos indicativos de una propiedad de un material de referencia pueden comprender un perfil de flujo de velocidad.

35 La pluralidad de factores de profundidad se puede generar sobre la base de una comparación entre mediciones realizadas por el aparato de medición y un perfil de flujo de referencia.

Se puede hacer que el material de referencia fluya a través del aparato de medición con el perfil de flujo de referencia. El perfil de flujo de referencia puede comprender un perfil de velocidad predeterminado. El material de referencia puede comprender un material que tenga características conocidas.

40 De esta manera, la pluralidad de factores de profundidad, que se han generado sobre la base del flujo de un material de referencia, se puede utilizar para mejorar la precisión de los datos indicativos de una propiedad del material. En particular, la pluralidad de factores de profundidad se puede aplicar a datos generados sobre la base de mediciones realizadas por cada una de las pluralidades de electrodos para corregir irregularidades en la sensibilidad de profundidad de las respectivas pluralidades de electrodos.

45 El ajuste de los datos generados puede comprender la aplicación de un factor de profundidad a los datos generados. Se puede usar un factor de profundidad para asignar los datos generados a una profundidad correspondiente dentro del aparato de medición.

50 El controlador puede estar dispuesto para generar la pluralidad de factores de profundidad durante un procedimiento de inicialización del aparato de medición. La generación de la pluralidad de factores de profundidad se puede repetir periódicamente durante el funcionamiento del aparato de medición. Alternativamente, la pluralidad de factores de profundidad se puede obtener a partir de mediciones realizadas por un aparato de medición alternativo que tiene características similares a las del aparato de medición, o características que tienen una relación conocida con las características del aparato de medición.

Las características arriba descritas (es decir, el uso de una pluralidad de factores de profundidad) se han descrito en combinación con una pluralidad de primeros electrodos. Sin embargo, se entenderá que estas técnicas también se pueden aplicar a mediciones realizadas utilizando pluralidades de segundos y/o terceros electrodos y/o pluralidades adicionales de primeros y/o segundos y/o terceros electrodos, tal como se ha descrito más arriba.

- 5 También se describe un método para generar la pluralidad de factores de profundidad para su uso en el aparato de medición arriba descrito.

El método puede comprender las etapas consistentes en: proporcionar un material de referencia con un perfil de flujo de referencia predeterminado; excitar, mediante la fuente de excitación, al menos uno de dichos electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos electrodos; monitorizar, mediante el monitor, un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos electrodos; generar, mediante el controlador, datos indicativos de una propiedad del material de referencia sobre la base de los parámetros eléctricos monitorizados; comparar los datos generados con el perfil de flujo de referencia; y generar los datos de referencia sobre la base de los resultados de la etapa de comparación.

15 También se describe un aparato de medición que comprende una tubería, en donde, durante el uso, se hace que un material fluya dentro de la tubería, una pluralidad de primeros electrodos asociados con una superficie de la tubería, estando separado cada uno de los primeros electrodos por al menos una primera separación predeterminada en una dirección de flujo de material dentro de dicha tubería; una fuente de excitación dispuesta para excitar al menos uno de dichos primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos primeros electrodos; un monitor dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos primeros electrodos; y un controlador dispuesto para generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una primera región de dicha tubería que se extiende una primera distancia desde dicha superficie de la tubería, sobre la base de dichos parámetros eléctricos monitorizados. Una anchura de al menos uno de los primeros electrodos en una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería es de al menos al 20% de un perímetro de la tubería.

La dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería puede ser una dirección circunferencial. La dirección del flujo de material dentro de la tubería puede ser sustancialmente paralela a un eje longitudinal de la tubería. La tubería puede tener una sección transversal circular. La dirección circunferencial de la tubería se puede definir como una dirección perpendicular al eje longitudinal de la tubería.

30 La superficie puede ser una superficie interior de la tubería. Al menos uno de los primeros electrodos puede estar situado en dicha superficie interior de la tubería. Cada uno de los primeros electrodos puede estar situado en dicha superficie interior de la tubería. Cada uno de los primeros electrodos puede tener una anchura en una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería de al menos al 20% de un perímetro de la tubería.

35 Al prever electrodos cuya anchura es de al menos el 20% del perímetro de la tubería, se puede mejorar la relación señal/ruido en los parámetros eléctricos monitorizados (y en los datos derivados de los mismos). Esto mejora a su vez la precisión de los datos indicativos de una propiedad del material generados por el controlador.

Durante el uso, la pluralidad de electrodos puede estar asociada con una superficie inferior de la tubería.

40 Al prever los electrodos en una superficie inferior de la tubería, es posible evitar la detección de inestabilidades en el flujo causadas por perturbaciones que generalmente se encuentran alrededor de la parte superior del material dentro de la tubería. Por ejemplo, cuando se arrastran burbujas de aire dentro del material dentro de la tubería, éstas tienden a encontrarse hacia la región superior dentro de la tubería. Además, dichas burbujas de aire arrastradas pueden introducir inestabilidades de medición y, por lo tanto, aumentar el ruido de medición. Al prever los electrodos en una superficie inferior de la tubería, es posible realizar mediciones solo en el material en una porción inferior de la tubería y, por lo tanto, evitar dicho aumento de ruido.

La anchura de al menos uno de los electrodos en una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería puede ser inferior a aproximadamente el 75% de un perímetro de la tubería.

Cada uno de los primeros electrodos puede tener una anchura en una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería de menos de aproximadamente el 75% de un perímetro de la tubería.

50 Al prever primeros electrodos con una anchura inferior al 75% del perímetro de la tubería, es posible evitar la detección de inestabilidades en el flujo que se sabe que ocupan una región particular dentro de la tubería. Por ejemplo, cuando se arrastran burbujas de aire dentro del material dentro de la tubería, éstas tienden a encontrarse hacia la región superior dentro de la tubería. Además, dichas burbujas de aire arrastradas pueden introducir inestabilidades de medición y, por lo tanto, aumentar el ruido de medición. Por lo tanto, al prever los electrodos alrededor de menos de aproximadamente el 75% (en lugar de alrededor de toda la circunferencia de la tubería), es posible detectar principalmente alrededor de solo una porción predeterminada de la tubería y, por lo tanto, evitar un aumento del ruido asociado con una perturbación conocida que ocurre dentro de una región particular de la tubería. Por supuesto, se

entenderá que se puede producir una perturbación en diferentes partes de una tubería. Por ejemplo, en lugar de burbujas de aire, la perturbación puede consistir en un sedimento que se forma en el fondo de la tubería.

5 Preferiblemente, la anchura de los electrodos a lo largo de una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería es superior a aproximadamente el 40% del perímetro de la tubería. Se ha descubierto que al mantener la anchura del electrodo por encima de aproximadamente el 40% del perímetro se puede lograr una relación señal/ruido mejorada.

10 Preferiblemente, la anchura de los electrodos a lo largo de una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería es inferior a aproximadamente el 60% del perímetro de la tubería. Se ha descubierto que al mantener la anchura de electrodo por debajo de aproximadamente el 60% del perímetro, los efectos introducidos por la presencia de perturbaciones, tales como, por ejemplo, burbujas de aire, se pueden reducir significativamente.

15 Lo más preferiblemente, la anchura de los electrodos a lo largo de una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería corresponde a aproximadamente la mitad del perímetro de la tubería. Se ha descubierto que la previsión de electrodos alrededor de la mitad del perímetro de la tubería proporciona, en algunas realizaciones, una solución intermedia óptima entre una maximización del área de adquisición de señales (y, por lo tanto, características de ruido mejoradas) y el riesgo de detectar burbujas de aire arrastradas (y, por lo tanto, características de ruido reducidas).

20 El aparato de medición arriba descrito puede comprender una tubería. Durante el uso se puede hacer que fluya material dentro de la tubería. Al menos uno de los electrodos puede estar asociado con una superficie de la tubería. La superficie puede ser una superficie interior de la tubería. Al menos uno de los electrodos puede estar situado sobre dicha superficie interior de la tubería. Cada uno de los electrodos puede estar situado sobre dicha superficie interior de la tubería.

25 También se describe un sistema de control industrial que comprende un aparato de medición arriba descrito. El sistema de control industrial puede estar dispuesto para controlar una característica de un proceso industrial sobre la base de dichos datos indicativos de una propiedad del material.

El sistema de control industrial puede estar dispuesto para controlar la característica del proceso industrial sobre la base de una relación entre dichos datos indicativos de una propiedad del material y datos de referencia indicativos de una propiedad de referencia de un material. La característica del proceso industrial puede ser, por ejemplo, una característica que influye en la mezcla de componentes de una composición producida industrialmente.

30 Si dichos datos indicativos de una propiedad del material no tienen una relación predeterminada con dichos datos de referencia, el sistema de control industrial puede estar dispuesto para modificar las características del proceso industrial con el fin de que los datos indicativos de la propiedad del material se aproximen a dichos datos de referencia (es decir, para que los datos tengan valores que se parezcan más a los datos de referencia).

35 El concepto de hacer que los datos indicativos de la propiedad del material se aproximen a dichos datos de referencia se puede entender como modificar dicha característica del proceso industrial de modo que los datos indicativos de la propiedad del material correspondan mejor a la relación predeterminada con dichos datos de referencia.

Alternativamente, el concepto de hacer que los datos indicativos de la propiedad del material se aproximen a dichos datos de referencia se puede entender como modificar dicha característica del proceso industrial de modo que los datos indicativos de la propiedad del material se acerquen o se muevan hacia dichos datos de referencia.

40 También se describe un método para operar un aparato de medición arriba descrito, o un sistema de control industrial arriba descrito.

Ahora se describirán realizaciones de la invención, a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

la Figura 1 es una ilustración esquemática de un aparato de acuerdo con una realización de la invención;

45 la Figura 2 es una ilustración esquemática de parte del aparato de la Figura 1;

la Figura 3 es una ilustración esquemática de un controlador que forma parte del aparato de la Figura 1;

la Figura 4 es una ilustración esquemática que muestra una realización alternativa de la invención;

la Figura 5 es una ilustración esquemática que muestra una característica determinada por un proceso llevado a cabo por el aparato de la Figura 1;

50 las Figuras 6a y 6b son ilustraciones esquemáticas que muestran realizaciones alternativas adicionales de la invención;

las Figuras 7a y 7b son gráficos de una característica del material en dos ubicaciones dentro del aparato de la Figura 6b en varios momentos;

la Figura 8 es una ilustración esquemática que muestra una realización alternativa adicional de la invención en un circuito de flujo;

5 las Figuras 9a y 9b son gráficos que muestran una característica determinada por un proceso llevado a cabo por el aparato de la Figura 8;

las Figuras 10a y 10b son gráficos que muestran una propiedad derivada de los datos mostrados en las Figuras 9a y 9b;

10 la Figura 11 es un gráfico de una característica del material en dos ubicaciones dentro del aparato de la Figura 8 en diversos momentos;

las Figuras 12a a 12c son ilustraciones esquemáticas que muestran perfiles de velocidad del material dentro del aparato de la Figura 8 bajo diferentes condiciones de flujo;

las Figuras 13a a 13c son gráficos que muestran perfiles de velocidad derivados de los datos mostrados en las Figuras 12a a 12c, respectivamente;

15 la Figura 14 es un diagrama de flujo que muestra el procesamiento realizado por el controlador de la Figura 3;

la Figura 15 es una ilustración esquemática de un aparato de acuerdo con una realización adicional de la invención;

20 las Figuras 16a y 16b son gráficos de una característica del material en dos ubicaciones dentro del aparato de la Figura 15 usando datos obtenidos con electrodos que tienen anchuras diferentes;

las Figuras 17a y 17b son gráficos que muestran perfiles de velocidad derivados de datos generados por el aparato de la Figura 15;

las Figuras 18a y 18b son gráficos que muestran perfiles de velocidad derivados de datos generados por el aparato de la Figura 15; y

25 la Figura 19 ilustra gráficos de perfiles de viscosidad de fluidos de goma xantana con diferentes fracciones de masa derivados de los datos generados por el aparato de la Figura 15.

Con referencia a la Figura 1, en ella se muestra un aparato 1 de medición según una realización de la invención. El aparato 1 de medición es un aparato de tomografía, y está dispuesto para medir propiedades de un material 2 dentro de una tubería 3 que tiene una sección transversal generalmente circular. El aparato 1 de medición está dispuesto en una superficie interior de la tubería 3. El material fluye en una dirección F.

30 El aparato 1 de medición tiene una pluralidad de primeros electrodos 4 y una pluralidad de segundos electrodos 5. La pluralidad de primeros electrodos 4 está dispuesta a lo largo de la superficie interior de la tubería 3 formando un primer conjunto ordenado 6 lineal. Los segundos electrodos 5 están dispuestos de forma similar a los primeros electrodos 4. Es decir, los segundos electrodos 5 también están dispuestos a lo largo de la superficie interior de la tubería 3 formando un segundo conjunto ordenado 7 lineal.

35 El aparato 1 de medición comprende además una fuente 8 de corriente y un monitor 9 de tensión, que están conectados de forma conmutable a cada uno de los electrodos 4, 5. En la configuración ilustrada, la fuente 8 de corriente está dispuesta para aplicar una corriente entre dos de los primeros electrodos 4, y el monitor 9 de tensión está dispuesto para monitorizar una tensión entre otros dos diferentes de los primeros electrodos 4. Tanto la fuente 8 de corriente como el monitor 9 de tensión están conectados a un controlador 10 y son controlados por el mismo.

40 La Figura 2 muestra la disposición de los electrodos 4, 5 con más detalle. Cada uno de los primeros electrodos 4 está separado por una separación S1 predeterminada a lo largo de la dirección en la que se extiende el conjunto ordenado 6. Cada uno de los primeros electrodos 4 tiene una longitud L1 a lo largo (es decir, axialmente) de la dirección en la que se extiende el conjunto ordenado 6, y una anchura W1 perpendicular a la dirección en la que se extiende el conjunto ordenado 6 (es decir, circunferencialmente).

45 Cada uno de los segundos electrodos 5 está separado por una separación S2 predeterminada a lo largo de la dirección en la que se extiende el conjunto ordenado 7, y una longitud L2 a lo largo de la dirección en la que se extiende el conjunto ordenado 7, y una anchura W2 perpendicular a la dirección en la que se extiende el conjunto ordenado 7. La separación S2 de los segundos electrodos 5 es mayor que la separación S1 de los primeros electrodos 4.

50 Las dimensiones de cada uno de los electrodos 4, 5 se seleccionan para proporcionar un área suficiente para inyectar una corriente de medición requerida en el material 2, de modo que se puedan realizar mediciones fiables. Un electrodo

más grande permitirá que se inyecte más corriente, pero adolecerá de una resolución de medición reducida (tal como se describe más abajo con mayor detalle). Cada uno de los electrodos 4, 5 está formado a partir de un material conductor, lo que permite que se establezca un contacto eléctrico entre los electrodos 4, 5 y el material 2 dentro de la tubería 3. Los electrodos pueden estar formados adecuadamente a partir de un material resistente a la corrosión tal como, por ejemplo, acero inoxidable. Los electrodos pueden estar configurados adecuadamente para permitir una operación higiénica, por ejemplo, en conformidad con las prácticas de limpieza *in situ* (CIP, por sus siglas en inglés) y/o de diseño higiénico como las especificadas por el Grupo Europeo de Ingeniería y Diseño Higiénico (EHEDG, por sus siglas en inglés).

Tal como se ha mencionado más arriba, cada uno de los electrodos 4, 5 está conectado de forma conmutable a la fuente 8 de corriente y al monitor 9 de tensión. En la disposición de la Figura 2, la fuente de corriente está dispuesta para aplicar una corriente entre dos de los primeros electrodos. Es decir, la fuente 8 de corriente, un primero de los electrodos 4, el material 2 y un segundo de los electrodos 4 forman un circuito. La corriente fluye desde la fuente 8 de corriente al material 2 a través del primer electrodo 4, antes de volver a la fuente 8 de corriente a través del segundo electrodo 4. El primer y el segundo electrodos, cuando están conectados a la fuente de corriente, se pueden designar como electrodos de excitación. La fuente de corriente puede estar dispuesta, por ejemplo, para suministrar una corriente alterna (CA) a los electrodos 4. La frecuencia de las señales aplicadas a los electrodos 4 varía dependiendo del material 2 dentro de la tubería 3. La frecuencia puede variar sobre la base de la conductividad y/o la reología del material 2 de interés. Por ejemplo, se puede usar una frecuencia más alta para un material que tenga una conductividad más baja y/o una viscosidad más alta. En algunas aplicaciones, una señal aplicada puede tener una frecuencia tan baja como alrededor de 1 kHz. Además, en algunas aplicaciones, una señal aplicada puede tener una frecuencia de hasta alrededor de 50 kHz.

De manera similar, la amplitud de las señales aplicadas a los electrodos 4 varía dependiendo del material 2 dentro de la tubería 3. Por ejemplo, en algunas aplicaciones, una señal aplicada puede tener una amplitud tan baja como alrededor de 0,1 mA. Además, en algunas aplicaciones, una señal aplicada puede tener una amplitud de hasta alrededor de 75 mA.

Se entenderá que la frecuencia y la amplitud de las señales aplicadas se pueden optimizar para cada combinación de material y proceso, por ejemplo mediante experimentación o por referencia a propiedades conocidas de los materiales analizados. Por ejemplo, cuando se sabe que un material analizado tiene una mayor impedancia a las señales eléctricas, se puede usar una señal de amplitud aumentada. Además, la impedancia eléctrica de un material a menudo variará en función de la frecuencia de excitación. Como tales, la frecuencia y la amplitud de excitación se pueden seleccionar para producir una distribución de campo potencial detectable en los electrodos del monitor.

Cada uno de los electrodos 4 también está conectado de forma conmutable al monitor 9 de tensión. Cuando está conectado a uno de los electrodos 4, el monitor de tensión está dispuesto para medir el potencial eléctrico en ese electrodo. Cada uno de los electrodos 4 tiene sustancialmente el mismo potencial que el material adyacente al electrodo 4 respectivo. Por lo tanto, midiendo el potencial eléctrico en los electrodos 4 se puede medir la diferencia de potencial entre diferentes ubicaciones dentro del material 2, tal como se describe más abajo con mayor detalle. El monitor 9 de tensión puede usar técnicas sincrónicas, tales como, por ejemplo, detección sensible a la fase, para detectar una señal que tenga la misma frecuencia que la corriente suministrada por la fuente 8 de corriente. Dicha detección sensible a la fase puede proporcionar una mayor inmunidad al ruido de fuentes de ruido de banda ancha permitiendo la detección solo en la frecuencia suministrada por la fuente 8 de corriente. El monitor 9 de tensión se puede configurar para medir la magnitud de la señal recibida en la frecuencia de alimentación. El monitor 9 de tensión también se puede configurar para medir el ángulo de fase de una señal medida con respecto a la fase de cualquier señal inyectada.

En la disposición de la Figura 2, cada uno de un par de electrodos 4 restantes está conectado al monitor 9 de tensión. En esta disposición, el monitor 9 de tensión puede medir la diferencia de potencial entre el par de electrodos 4 y, por lo tanto, la diferencia de potencial entre las regiones del material 2 adyacentes a los electrodos 4 respectivos. Los electrodos 4, cuando están conectados al monitor, se pueden designar como electrodos de monitor. El flujo de corriente y la distribución de diferencia de potencial dentro del material 2 se describen más abajo con mayor detalle.

La Figura 3 muestra el controlador 10 con mayor detalle. Se puede ver que el controlador 10 comprende una CPU 10a que está configurada para leer y ejecutar instrucciones almacenadas en una memoria volátil 10b que adopta la forma de una memoria de acceso aleatorio. La memoria volátil 10b almacena instrucciones para su ejecución por parte de la CPU 10a y datos utilizados por esas instrucciones. Por ejemplo, durante el uso, los valores de tensión medidos se pueden almacenar en la memoria volátil 10b.

El controlador 10 comprende además un almacenamiento no volátil en forma de una unidad 10c de estado sólido. Los valores de tensión medidos y los valores de resistividad calculados se pueden almacenar en la unidad 10c de estado sólido. El controlador 10 comprende además una interfaz 10d de E/S a la que están conectados dispositivos periféricos utilizados en relación con la obtención de las señales medidas. Más particularmente, una fuente 8 de corriente y un monitor 9 de tensión están conectados a la interfaz 10d de E/S.

Una interfaz 10h de red permite que el controlador 10 de sonda se conecte a una red informática, para recibir y transmitir datos desde y hacia otros ordenadores en esa red. La CPU 10a, la memoria volátil 10b, la unidad 10c de estado sólido, la interfaz 10d de E/S y la interfaz 10h de red están conectadas entre sí por un bus 10i.

5 Durante el uso se llevan a cabo mediciones de tomografía de resistencia eléctrica (ERT) utilizando el aparato 1 de medición. Las mediciones de ERT comprenden inyectar una corriente predeterminada entre los electrodos 4, 5 seleccionados y medir la tensión entre pares de electrodos 4, 5. Más arriba se ha descrito una medición de este tipo con referencia al primer y el segundo electrodos 4 (electrodos de excitación), y un par de los electrodos 4 restantes (electrodos de monitor). Una vez que se completa una primera medición, y mientras se sigue inyectando la corriente entre los electrodos de excitación, se mide una diferencia de potencial entre diferentes combinaciones de los
10 electrodos restantes. Luego se inyecta una corriente entre un par adyacente diferente de los electrodos 4, y se miden las diferencias de potencial entre pares de los electrodos 4 restantes.

15 Las mediciones de ERT generalmente se llevan a cabo usando secuencias de excitación de electrodos similares a las que se usan normalmente con conjuntos ordenados circulares. Por ejemplo, en una realización, las mediciones de ERT se realizan utilizando un conjunto ordenado lineal de ocho elementos (es decir, un conjunto ordenado que comprende ocho electrodos 4b-4i de medición y dos electrodos 4a, 4j de tierra) con mediciones realizadas en la secuencia descrita más abajo. Dicha secuencia de excitación se puede referir generalmente a la excitación de electrodos adyacentes.

Primero se inyecta corriente entre los electrodos 4i y 4b, y se miden las tensiones entre los pares de electrodos 4c-4d, 4d-4e, 4e-4f, 4f-4g y 4g-4h.

20 Luego se inyecta corriente entre los electrodos 4b y 4c, y se miden las tensiones entre cada uno de los pares de electrodos 4d-4e, 4e-4f, 4f-4g, 4g-4h y 4h-4i.

Luego se inyecta corriente entre los electrodos 4c y 4d, y se miden las tensiones entre cada uno de los pares de electrodos 4e-4f, 4f-4g, 4g-4h y 4h-4i.

25 Luego se inyecta corriente entre los electrodos 4d y 4e, y se miden las tensiones entre cada uno de los pares de electrodos 4f-4g, 4g-4h y 4h-4i.

Luego se inyecta corriente entre los electrodos 4e y 4f, y se miden las tensiones entre cada uno de los pares de electrodos 4g-4h y 4h-4i.

Finalmente se inyecta corriente entre los electrodos 4f y 4g, y se miden las tensiones entre los electrodos 4h-4i.

30 Se ha de señalar que la primera de las excitaciones arriba descritas no es "adyacente", ya que los electrodos 4b y 4i están dispuestos hacia extremos opuestos del conjunto ordenado. Sin embargo, la provisión de dicha excitación proporciona una sensibilidad de profundidad adicional en el cuerpo de la tubería 3, permitiendo que el sensor de ERT lineal tenga un mayor campo de visión.

35 En términos generales, el proceso de excitación continúa hasta que se hayan excitado todas las combinaciones de pares de electrodos adyacentes y que, para cada excitación, todas las combinaciones de pares de electrodos se hayan sometido a mediciones de diferencia de potencial. Sin embargo, se entenderá que algunas combinaciones de electrodos se pueden excluir de este proceso de medición, como por ejemplo la combinación inversa de mediciones ya realizadas. Por ejemplo, cuando un primer par de electrodos han servido como electrodos de excitación y un segundo par de electrodos como electrodos de monitor, no es necesario realizar las mediciones inversas (es decir, el segundo par como electrodos de excitación y el primer par como electrodos de monitor).

40 En general se considera que la estrategia de excitación de electrodos adyacentes arriba descrita proporciona una alta sensibilidad en regiones cercanas a los electrodos, con una sensibilidad reducida a distancia de los electrodos.

45 Por supuesto, si bien más arriba se han descrito excitaciones de electrodos adyacentes, se pueden preferir otros protocolos de excitación, como por ejemplo una secuencia de excitación de electrodos opuesta. Por ejemplo, se podría inyectar corriente entre pares de electrodos que están separados entre sí. En un ejemplo, la corriente de secuencia de excitación se inyectaría primero entre los electrodos 4b y 4f, y se medirían los potenciales entre los pares de electrodos 4c-4d, 4d-4e, 4g-4h y 4h-4i. También se pueden medir potenciales entre pares de electrodos no adyacentes. Dicha secuencia de excitación se puede usar para mejorar la distribución del campo dentro del material 2 y mejorar la sensibilidad del campo lejano. No obstante, se ha de señalar que, cuando se utilizan estrategias de excitación de electrodos no adyacentes, el número de las posibles combinaciones de excitación de electrodos aumenta
50 significativamente, lo que requiere un sistema de multiplexación más amplio y un procesamiento posterior de los datos más extenso que en el caso de las estrategias de excitación de electrodos adyacentes.

Además, se pueden preferir diferentes protocolos o disposiciones de excitación de electrodos para diferentes aplicaciones o requisitos de formación de imágenes para optimizar la sensibilidad a propiedades particulares de interés.

Por ejemplo, se puede utilizar una estrategia de excitación en la que primero se inyecta corriente entre un par de electrodos externos (por ejemplo, electrodos 4b-4i), y se miden los potenciales entre cada otro par de electrodos entre los electrodos de inyección (por ejemplo, 4c-4d, 4d-4e, 4e-4f, 4f-4g, 4g-4h). Después se excita el siguiente par más externo (por ejemplo, electrodos 4c-4h), y se miden los potenciales entre los pares de electrodos internos restantes (por ejemplo, 4d-4e, 4e-4f, 4f-4g) y así sucesivamente. Esta estrategia de excitación puede mejorar la sensibilidad dentro del centro de la tubería.

Además se pueden usar disposiciones alternativas de conjuntos ordenados para mejorar la sensibilidad en la pared o periferia de la tubería. Por ejemplo, se puede usar un conjunto ordenado de Wenner que comprende cuatro electrodos con la misma separación. En general se inyecta corriente entre los dos electrodos externos, mientras que el potencial se mide entre los dos electrodos internos. Esta disposición puede proporcionar una alta sensibilidad a la falta de homogeneidad de la superficie cercana. Sin embargo, dicha alta sensibilidad a las condiciones de la superficie cercana también puede dar como resultado respuestas distorsionadas a los campos eléctricos que se establecen más lejos de la superficie. Como tal, un conjunto ordenado de Wenner se puede usar para mejorar la sensibilidad en la pared o periferia de la tubería.

Se entenderá que cuando se utilizan conjuntos ordenados de electrodos con un número de electrodos mayor (o menor) que ocho, las estrategias de excitación se pueden adaptar en consecuencia.

Las diversas excitaciones y mediciones arriba descritas permiten determinar información relacionada con la resistividad del material 2. Al inyectar corrientes en el material 2, se establece una distribución de potencial eléctrico dentro del material 2. A lo largo del recorrido de corriente entre los dos electrodos de excitación 4 se desarrolla una reducción gradual del potencial, con corriente que fluye de un potencial más alto a un potencial más bajo. Esta distribución de potencial también se extiende a través de la región de material 2 que rodea los electrodos, lo que resulta en diferencias de potencial observables en los electrodos 4. Sin embargo, en lugar de ser una reducción uniforme del potencial a lo largo del recorrido de corriente entre los dos electrodos 4 de excitación, la tasa de cambio de potencial en cualquier parte dada del material 2 depende de la resistividad del material 2 en esa parte particular. Como tal, la resistividad del material 2 influye en las diferencias de potencial observadas. Además, la longitud del conjunto ordenado 6 y la selección de cuáles de los electrodos 4 se excitan y monitorizan dentro del conjunto ordenado 6 dan como resultado una región de medición efectiva, o campo de visión, que se extiende hacia el material 2 en el plano del conjunto ordenado 6.

En términos generales se entenderá que, cuando se inyecta una corriente entre electrodos directamente adyacentes, como por ejemplo los electrodos 4a, 4b, el campo eléctrico generado dentro del material es más fuerte entre esos dos electrodos 4a, 4b. La intensidad del campo eléctrico y la distribución de potencial resultante decaen en el material restante 2 a medida que aumenta la distancia desde la superficie de los electrodos 4. Sin embargo, cuando se inyecta corriente desde electrodos no adyacentes (por ejemplo, los electrodos 4a, 4d), el campo eléctrico generado se extiende más allá de los electrodos hacia el material. Como tal, excitando y monitorizando diferentes combinaciones de electrodos es posible recopilar información relacionada con el material 2 que no está situado directamente junto a los electrodos 4.

Por lo tanto, las fluctuaciones en la resistividad del material conducen a fluctuaciones correspondientes en las diferencias de potencial medidas. Una vez que se ha llevado a cabo cada una de las mediciones arriba descritas, el controlador 10 procesa los datos medidos, en combinación con el conocimiento de las relaciones geométricas entre los diversos electrodos 4 para generar un conjunto de resistividades eléctricas que representan la distribución del potencial en todo el material 2 dentro de la región alrededor de los electrodos 4 de medición. El conjunto de resistividades eléctricas generado corresponde en cada caso a una subregión dentro del material 2, formando el conjunto completo de resistividades eléctricas juntas un mapa de la distribución de resistividades eléctricas dentro del material 2. Un experto en la técnica conocerá el procesamiento necesario para generar el conjunto de resistividades eléctricas representativo de la distribución del potencial a través del material 2 dentro de la región alrededor de los electrodos 4 de medición.

Un proceso de excitación, medición y procesamiento tal como se ha descrito más arriba con referencia a los primeros electrodos 4 también se lleva a cabo utilizando los segundos electrodos 5. Sin embargo, la separación de los electrodos 5 es menor que la de los primeros electrodos 4, con lo que la profundidad de material 2 de los segundos electrodos 5 que influye significativamente en las mediciones se reduce en consecuencia. Esto se puede entender con referencia a la Figura 2.

El campo eléctrico establecido por el flujo de corriente a través del material 2 se extenderá infinitamente lejos de los electrodos 4, 5. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia desde los electrodos 4, 5, la intensidad del campo se reduce gradualmente, para finalmente volverse insignificante. Como tal, es posible definir un campo de visión 10 que es una región que rodea los electrodos 4 en la que se considera que las propiedades del material 2 tienen una influencia medible en el flujo de corriente entre las diversas combinaciones de electrodos 4. El campo de visión 10 se extiende dentro del material 2 una primera distancia 11, que está relacionada con la distancia entre los electrodos de excitación dentro del primer conjunto ordenado 6.

De manera similar, es posible definir un campo de visión 12 que consiste en una región que rodea los electrodos 5 en la que se considera que las propiedades del material 2 tienen una influencia medible en el flujo de corriente entre las diversas combinaciones de electrodos 5. El campo de visión 12 se extiende dentro del material 2 una segunda distancia 13, que está relacionada con la separación de los electrodos 5 dentro del segundo conjunto ordenado 7.

5 El número, las dimensiones y la separación de cada uno de los electrodos 4, 5 dentro del primer y el segundo conjuntos ordenados 6, 7 y, por lo tanto, las longitudes respectivas de los conjuntos ordenados 6, 7, influyen en la distancia 11, 13 respectiva que se extienden las regiones 10, 12 hacia el material 2.

10 Por ejemplo, el primer conjunto ordenado 6 que comprende diez primeros electrodos 4, cada uno con una longitud L1 de 1,8 mm, una separación S1 de 1,8 mm, tiene una longitud total de aproximadamente 34,2 mm. Este conjunto ordenado puede dar como resultado que la región 10 tenga una primera distancia 11 de aproximadamente 12,7 mm. Es decir, dicho conjunto ordenado permitiría realizar mediciones de material en la región que se extiende hasta 12,7 mm desde la superficie de los electrodos. Los primeros electrodos pueden tener adecuadamente una anchura W1 de aproximadamente 8 mm. La anchura W1 se selecciona de modo que se proporcione un área de electrodo que sea adecuada para inyectar la corriente requerida para las mediciones arriba descritas. La anchura W1 en sí misma no influye directamente en la resolución de medición o el campo de visión.

15 Esto se puede contrastar con un segundo conjunto ordenado 7 que comprende 10 segundos electrodos 5, cada uno con una longitud L1 de 0,4 mm, una separación S1 de 0,4 mm y una longitud total de alrededor de 8 mm. Este conjunto ordenado puede dar como resultado que la región 10 tenga una primera distancia 11 de aproximadamente 2,54 mm. Es decir, dicho conjunto ordenado permitiría realizar mediciones de material en la región que se extiende hasta 2,54 mm desde la superficie de los electrodos 5. Los segundos electrodos pueden tener adecuadamente una anchura W2 de aproximadamente 2,54 mm. La anchura W2 se selecciona de modo que se proporcione un área de electrodo que sea adecuada para inyectar la corriente requerida para las mediciones arriba descritas. La anchura W2 no influye directamente en la resolución de medición o el campo de visión.

20 Además de la reducción del tamaño de la región medida por el segundo conjunto ordenado 7 con respecto al primer conjunto ordenado 6, también se logra un aumento correspondiente de la resolución de medición. Tal como se ha descrito más arriba, las mediciones de diferencia de potencial realizadas se usan para generar un mapa bidimensional de la resistividad dentro de las regiones de medición, dividiéndose cada región en una pluralidad de subregiones. Al permitir un número similar de subregiones dentro de cada región, el segundo conjunto ordenado 7 permite que cada subregión dentro de la región 13 sea aproximadamente 5 veces más pequeña que cada una de las subregiones dentro de la región 11.

25 El número de subregiones puede variar según las condiciones de medición y la geometría. En algunas realizaciones se pueden prever cuatro subregiones dentro de cada región. Las subregiones pueden estar distribuidas, por ejemplo, de modo que se extiendan en una dirección paralela a la pared de la tubería, estando cada subregión asociada con una distancia nominal particular desde la pared de la tubería (es decir, una profundidad nominal en la tubería). Es decir, a medida que aumenta la distancia desde la pared de la tubería hacia el centro de la tubería en una dirección normal a la superficie de la pared de la tubería, se pueden atravesar varias subregiones.

30 Mediante el uso de un primer conjunto ordenado 6, que permite mediciones profundas en el material 2 (aunque con una resolución relativamente baja), y un segundo conjunto ordenado 7, que permite mediciones con una alta resolución (aunque con una profundidad relativamente baja), se puede determinar información detallada relacionada con la distribución del material 2 dentro de la tubería 3. El primer conjunto ordenado 6 se puede designar como conjunto de campo lejano, que permite mediciones profundas en el material 2. Del mismo modo, el segundo conjunto ordenado 7 se puede designar como conjunto de campo cercano, que permite realizar mediciones detalladas del material directamente adyacente al conjunto ordenado 7.

35 Se entenderá que es la longitud total de un conjunto ordenado lo que determina la profundidad del campo de visión posible con ese conjunto ordenado. Como tal, un campo de visión equivalente se puede establecer mediante dos conjuntos ordenados que tengan diferentes números y separaciones de electrodos, siempre que la longitud total de los conjuntos ordenados sea igual.

40 Además, mediante una disposición adecuada del primer y el segundo conjuntos ordenados 6, 7, se puede considerar que las mediciones realizadas por cada uno de los conjuntos ordenados representan sustancialmente el mismo volumen de material 2. Es decir, siempre que la separación entre el primer conjunto ordenado 6 y el segundo conjunto ordenado 7 sea relativamente pequeña en comparación con cualquier cambio en las condiciones de flujo de material dentro de la tubería (que puede depender, por ejemplo, de la velocidad de flujo, la turbulencia del flujo, la viscosidad del material 2, entre otras cosas), se puede generar un mapa compuesto de la resistividad del material 2 dentro de la tubería sobre la base de mediciones realizadas por los dos conjuntos ordenados 6, 7. Dicho mapa compuesto puede tener diferentes resoluciones en diferentes regiones.

45 Por ejemplo, cuando el material 2 comprende una mezcla de diferentes componentes de material, pudiendo tener cada uno de ellos una resistividad diferente (y conocida), puede ser posible identificar las proporciones de cada uno de estos componentes de material dentro del material 2 mediante un procesamiento adicional de las resistividades

eléctricas generadas tal como se describe más arriba. Es decir, el valor de resistividad asociado con cada una de las subregiones se puede convertir en una fracción volumétrica de cada uno de los componentes de material dentro de esa subregión.

5 De este modo, el procesamiento arriba descrito se puede usar para determinar el grado en que los diferentes componentes de material se mezclan dentro del material en función de la ubicación dentro de la tubería 3. La resolución mejorada de los datos de resistividad disponibles gracias al uso del segundo conjunto ordenado 7 permite determinar información detallada sobre la composición del material en los bordes de la tubería 3.

10 Además del uso de los primeros y segundos conjuntos ordenados arriba descritos, se pueden prever primeros y segundos conjuntos ordenados adicionales de primeros y segundos electrodos 4, 5. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 4, una tubería 3 está provista de dos de dichos primeros conjuntos ordenados 20a, 20b y dos de dichos segundos conjuntos ordenados 21a, 21b dispuestos como pares de conjuntos ordenados (es decir, 20a y 21a, 20b y 21b) situados a lo largo de la longitud de la tubería 3 y separados por un intervalo predeterminado. A través de la realización de mediciones tal como se ha descrito más arriba con cada uno de los conjuntos ordenados 20a, 20b, 21a, 21b, es posible estudiar el flujo del material 2 a lo largo de la tubería 3.

15 Por supuesto, se entenderá que, en algunas realizaciones, los primeros conjuntos ordenados 20a, 20b y los segundos conjuntos ordenados 21a, 21b pueden estar dispuestos en una configuración diferente. Por ejemplo, los dos primeros conjuntos ordenados 20a, 20b pueden estar previstos adyacentes entre sí, y los dos segundos conjuntos ordenados 21a, 21b también pueden estar previstos adyacentes entre sí, en lugar de alternar como se ilustra en la Figura 4.

20 Por ejemplo, mediante la realización de una serie de mediciones con cada uno de los conjuntos ordenados en diferentes momentos y después una correlación cruzada de los resultados, se puede generar una medida de la velocidad de flujo del material 2. Dichas mediciones y correlaciones cruzadas repetidas permiten estudiar la velocidad y el perfil de velocidad del material 2 con cierto detalle en la ubicación de cada uno de los conjuntos ordenados 20a, 20b, 21a, 21b.

25 Mediante una disposición adecuada de los pares de primeros y segundos conjuntos ordenados se puede considerar que las mediciones realizadas por cada uno de los conjuntos ordenados representan sustancialmente el mismo volumen de material 2. Por lo tanto, siempre que la separación entre el primer conjunto ordenado 20a y el segundo conjunto ordenado correspondiente 21a sea pequeña en comparación con la separación entre el primer conjunto ordenado 20a y el segundo conjunto ordenado 20b, se puede considerar que cada par de conjuntos ordenados representa una ubicación particular a lo largo de la tubería 3. Además, se entenderá que, si hay una velocidad uniforme dentro del material 2 entre cada uno de los conjuntos ordenados, las mediciones similares realizadas por cada uno de los conjuntos ordenados mostrarán resistividades correspondientes (siempre que se aplique un retardo de tiempo apropiado).

30 Sin embargo, si no hay uniformidades dentro del flujo de material (lo que es muy probable), existirá algún cambio entre las mediciones realizadas por cada uno de los pares de conjuntos ordenados. Mediante el análisis de estas diferencias se puede obtener información sobre el flujo de material y cualquier cambio en ese flujo.

40 En particular, cuando el material 2 fluye a lo largo de la tubería 3, se puede descubrir que hay una diferencia significativa entre la velocidad del material adyacente a las paredes de la tubería y la del material dentro del centro de la tubería. Además, la tasa de cambio de velocidad en función de la distancia desde la pared de la tubería puede cambiar significativamente en la región adyacente a las paredes de la tubería 3, y más gradualmente en el centro de la tubería 3.

Además, en algunas realizaciones, el perfil de velocidad del material que fluye dentro de la tubería (obtenido mediante el aparato arriba descrito) se puede usar para determinar la reología. Por ejemplo, la información relacionada con los cambios en la velocidad en diferentes subregiones dentro de la tubería se puede utilizar para comprender mejor la forma en la que el material fluye y se mezcla dentro de la tubería.

45 La Figura 5 ilustra un ejemplo de un perfil de velocidad (en el eje "y") en función de la distancia desde la pared de una tubería normalizada por el radio de la tubería (en el eje "x"). El perfil de velocidad que se muestra en la Figura 5 se puede obtener mediante análisis de mediciones de resistividad obtenidas con el aparato arriba descrito. Se puede ver que la velocidad en la pared de la tubería, en una región A del gráfico, es significativamente diferente de la velocidad en el centro de la tubería, en una región B del gráfico. Además, se ve un cambio brusco de velocidad en una región C del gráfico, entre las regiones A y B. Es decir, a medida que aumenta la distancia desde la pared de la tubería, la velocidad generalmente aumenta, siendo la tasa de aumento inicialmente baja (en la región A) e incrementándose la tasa de aumento significativamente en la región C, antes de que la tasa de aumento se reduzca a aproximadamente cero en la región B. Además se puede ver que en la pared de la tubería (región D) la velocidad tiene un valor finito que es no cero. No obstante, se entenderá que debido a la interacción entre la pared de la tubería y el material dentro de la tubería, la velocidad probablemente caerá a cero inmediatamente junto a la pared de la tubería. Como tal, el uso de los primeros y segundos conjuntos ordenados, cada uno con diferentes sensibilidades de profundidad, puede permitir sondear esta región con más detalle.

Más arriba se ha descrito que el grado de mezcla dentro de un material que comprende una mezcla de varios componentes de material se puede estudiar por referencia a variaciones de resistividad dentro del material combinado. Sin embargo, cuando un material es homogéneo, no existe dicha variación de resistividad. Para estudiar el flujo de estos materiales homogéneos, es posible introducir alguna forma de material trazador que tenga una resistividad diferente a la del material homogéneo para causar una alteración en las resistividades medidas. La propagación de dicha alteración se puede monitorizar a medida que avanza a lo largo de la tubería 3, lo que proporciona información sobre la velocidad relativa de diferentes subregiones dentro del material 2.

Alternativamente se puede introducir una perturbación térmica para lograr el mismo propósito. Por ejemplo, dentro de la tubería 3 puede estar situado un calentador (por ejemplo, un calentador de inducción) que permite calentar localmente una pequeña región del material. Cuando la resistividad del material cambia como resultado del cambio de temperatura, este cambio se puede medir mediante el procesamiento arriba descrito. El material calentado se transportará después a lo largo de la tubería 3, y se puede monitorizar un cambio en la resistividad del material a medida que éste avanza a lo largo de la tubería, proporcionando información relacionada con la velocidad relativa de diferentes subregiones dentro del material 2.

En una realización se puede usar un aparato para monitorizar la mezcla de un material dentro de un recipiente de mezcla. Las Figuras 6a y 6b muestran un recipiente 30 de mezcla que tiene un elemento 31 de mezcla y que contiene un material 32 que está siendo mezclado. El recipiente 30 está provisto de dos primeros conjuntos ordenados 33a, 33b de electrodos y dos segundos conjuntos ordenados 34a, 34b de electrodos que están previstos alrededor de la superficie interior del recipiente 30. En la Figura 6a, los conjuntos ordenados de electrodos están dispuestos alternando entre primeros y segundos conjuntos ordenados de electrodos en la dirección de flujo F. Es decir, el material 32 fluye más allá de los electrodos en la siguiente secuencia: primer conjunto ordenado 33a de electrodos, segundo conjunto ordenado 34a de electrodos, primer conjunto ordenado 33b de electrodos, segundo conjunto ordenado 34b de electrodos. En una realización alternativa, tal como se muestra en la Figura 6b, los conjuntos ordenados 33a, 33b, 34a, 34b de electrodos están reorganizados de modo que el material 32 fluye más allá de los electrodos en la siguiente secuencia: primer conjunto ordenado 33a de electrodos, primer conjunto ordenado 33b de electrodos, segundo conjunto ordenado 34a de electrodos, segundo conjunto ordenado 34b de electrodos. Se entenderá que son posibles otras disposiciones de electrodos. La siguiente (y la anterior) descripción se aplica igualmente a las disposiciones de las Figuras 6a y 6b.

La realización de mediciones tal como se ha descrito más arriba usando cada uno de los primeros y segundos conjuntos ordenados 33a, 33b, 34a, 34b permite determinar información con respecto a la resistividad del material 32 dentro del recipiente 30. Esta información se procesa, tal como se ha descrito más arriba, para generar información relacionada con la velocidad y la mezcla del material 32 según se requiera.

Opcionalmente está previsto un dispositivo 35 de perturbación en la pared interior del recipiente 30 de mezcla, que está dispuesto para introducir una perturbación de resistividad (por ejemplo, un trazador o una perturbación térmica) para permitir mediciones de velocidad dentro de materiales homogéneos. El dispositivo 35 de perturbación puede inyectar dentro del recipiente de mezcla un material (por ejemplo, un elemento trazador) que crea un contraste de conductividad con el material a granel. Se entenderá que dicho elemento trazador no debe contaminar el material a granel. En algunas realizaciones, el elemento trazador consiste en una porción del material a granel que se ha calentado o enfriado. Preferiblemente, cuando se usa dicho elemento trazador calentado (o enfriado), el material se calienta (o enfría) lo suficiente para proporcionar un contraste de conductividad, sin distorsionar significativamente las propiedades reológicas del material. En lugar de un elemento trazador calentado (o enfriado), puede ser posible inyectar un material diferente que tenga características de conductividad sensiblemente diferentes a las del material a granel.

Mediante la adquisición de datos de los conjuntos ordenados 33a, 33b, 34a, 34b de electrodos se puede obtener una medida de la resistividad en varias subregiones predeterminadas dentro del recipiente de mezcla 30. Por ejemplo, el uso de dos conjuntos ordenados 33a, 33b similares de electrodos permite realizar una medición similar en una primera ubicación 36 (o plano de detección) y en una segunda ubicación 37 (o plano de detección). Además, realizando mediciones repetidas en la primera ubicación 36 y la segunda ubicación 36, y comparando los resultados, es posible monitorizar el movimiento de una parte de material dentro del recipiente 30. Se entenderá que, tal como se ha descrito más arriba, los datos obtenidos de los conjuntos ordenados 33a, 34a se pueden combinar para proporcionar información relacionada con la resistividad en un intervalo de profundidades en la primera ubicación 36. Del mismo modo, los datos obtenidos de los conjuntos ordenados 33b, 34b se pueden combinar para proporcionar información relacionada con la resistividad en un intervalo de profundidades en la segunda ubicación 37. La Figura 7a muestra un ejemplo de datos adquiridos de conjuntos ordenados 33a, 33b, 34a, 34b de electrodos dispuestos alrededor de la superficie interior de un recipiente 30 de mezcla. El material 32 dentro del recipiente 30 es líquido de lavado. Durante la mezcla, el dispositivo 35 de perturbación inyecta un elemento trazador. Por ejemplo, el elemento trazador puede consistir en un líquido que tiene una resistividad más alta que el material a granel dentro del recipiente de mezcla. El elemento trazador puede consistir en una parte del material a granel que se calienta. El eje "x" representa el marco de medición (los números crecientes indican un tiempo creciente) mientras que el eje "y" representa una medida de resistividad en la primera o segunda ubicaciones 36, 37.

Se puede ver que, en la primera ubicación 36, la resistividad aumenta alrededor del marco 136 desde un valor de base de aproximadamente 0,42 hasta un valor máximo de alrededor de 0,55, con el pico centrado alrededor del marco 271. La resistividad retrocede después a aproximadamente el valor de base alrededor del marco 451.

5 También se puede ver que, en la segunda ubicación 37, la resistividad aumenta alrededor del marco 541 desde un valor de base de aproximadamente 0,43 hasta un valor máximo de alrededor de 0,49, con el pico centrado alrededor del marco 721. La resistividad retrocede después a aproximadamente el valor de base alrededor del marco 991.

10 Al comparar las variaciones de resistividad arriba descritas en la primera y segunda ubicaciones 36, 37, se puede entender que al menos una parte del elemento trazador, que es responsable del aumento de la resistividad, se ha movido de la primera ubicación a la segunda ubicación. Además, dada la amplitud reducida del aumento de la resistividad entre la primera y la segunda ubicaciones 36, 37, y la duración del aumento a lo largo de la cual se puede observar el aumento de la resistividad en la segunda ubicación 37 en comparación con la primera ubicación 36, se puede concluir que el elemento trazador se ha dispersado algo a medida que la región general del material en el que se ha inyectado el mismo ha avanzado entre la primera y la segunda ubicaciones 36, 37. Por ejemplo, cuando el material más cercano a la pared del recipiente 30 de mezcla se mueve más lentamente que hacia el centro del recipiente 30, se entenderá que una porción inicialmente localizada de material trazador inyectado se puede deslocalizar.

15 La Figura 7b muestra otro ejemplo de datos adquiridos de conjuntos ordenados 33a, 33b, 34a, 34b de electrodos dispuestos alrededor de la superficie interior de un recipiente 30 de mezcla. El material 32 dentro del recipiente 30 es un fluido newtoniano. Durante la mezcla se inyecta un elemento trazador mediante un dispositivo 35 de perturbación. El elemento trazador puede consistir, por ejemplo, en un líquido con una resistividad más alta que la del material a granel dentro del recipiente de mezcla. El eje "x" representa el marco de medición (números crecientes indican un tiempo creciente) mientras que el eje "y" representa una medida de resistividad en la primera o segunda ubicaciones 36, 37.

20 Se puede ver que, en la primera ubicación 36, la resistividad aumenta alrededor del marco 157 desde un valor de base de aproximadamente 0,46 hasta un valor máximo de aproximadamente 0,5, con el pico centrado alrededor del marco 261. La resistividad retrocede después a aproximadamente el valor de base alrededor del marco 521.

25 También se puede ver que, en la segunda ubicación 37, la resistividad aumenta alrededor del marco 261 desde un valor de referencia de aproximadamente 0,46 hasta un valor máximo de alrededor de 0,485, con el pico centrado alrededor del marco 365. La resistividad retrocede después a aproximadamente el valor de base alrededor del marco 469.

30 Al comparar estas variaciones de la resistividad en la primera y segunda ubicaciones 36, 37, se puede entender que el elemento trazador, que es responsable del aumento de la resistividad, se ha movido de la primera ubicación a la segunda ubicación. Además, dada la amplitud reducida del aumento de la resistividad entre la primera y la segunda ubicaciones 36, 37, se puede concluir que el elemento trazador se ha dispersado algo a medida que la región general del material en el que se ha inyectado el mismo ha avanzado entre la primera y la segunda ubicaciones 36, 37. Se observa que la duración a lo largo de la cual persiste el aumento de la resistividad es mayor en la primera ubicación 36 que en la segunda ubicación 37. Esto puede ser, por ejemplo, una evidencia de que al menos una parte del material trazador permanece en la primera ubicación y no es transportado efectivamente por el elemento 31 de mezcla. Dicha información puede proporcionar información útil del proceso.

35 Tal como se ha descrito más arriba con referencia a las Figuras 7a y 7b, a partir de mediciones de resistividad obtenidas de los conjuntos ordenados 33a, 33b, 34a, 34b de electrodos se puede determinar información relativa a la reología del material 30.

40 El uso de técnicas de correlación cruzada se puede aplicar a mediciones realizadas en ubicaciones separadas físicamente para determinar una diferencia entre ellas. Dichas técnicas, cuando se aplican a sensores de ERT circulares convencionales (que proporcionan detección en un plano perpendicular a una dirección de flujo), permiten determinar un perfil de velocidad del material que fluye.

45 Sin embargo, la aplicación de dichas técnicas de correlación cruzada a datos obtenidos mediante el uso de sensores de ERT lineales (tal como se ha descrito más arriba), en los que el plano de detección es sustancialmente paralelo a una dirección de flujo, proporciona una sensibilidad adicional. Además, el uso de dichas técnicas con sensores de ERT lineales que tienen diferentes sensibilidades de profundidad permite medir información de velocidad a diferentes profundidades dentro de la tubería. Aún más, el hecho de que el plano de detección sea sustancialmente paralelo a una dirección de flujo permite utilizar la autocorrelación de datos obtenidos de un único sensor de ERT para determinar el caudal. Es decir, utilizando una pluralidad de electrodos distribuidos a lo largo de la dirección del flujo de un material (ya sea en un solo conjunto ordenado o en una pluralidad de conjuntos ordenados), y realizando mediciones en una pluralidad de momentos diferentes, es posible derivar información indicativa de la velocidad de movimiento del material adyacente al sensor. Se entenderá que dicha detección tiene una aplicación particular en tuberías donde se sabe que el flujo tiene un caudal uniforme para cualquier posición radial dada.

5 La Figura 8 muestra un aparato 40 de prueba utilizado para recopilar datos experimentales que se describe más abajo con mayor detalle. El aparato 40 comprende un sensor 41 (que es similar al arriba descrito con referencia a la Figura 4), una serie de tuberías 42 y una bomba 43. El sensor 41, las tuberías 42 y la bomba 43 están dispuestos como un circuito de flujo que permite que un material 44 circule dentro de las tuberías en una dirección F bajo condiciones de flujo controlado. El aparato 40 comprende además un sensor 45 de flujo másico que está dispuesto para proporcionar una medición independiente del caudal másico promedio dentro del circuito de flujo. El aparato 40 comprende además una parte 46 de inyección de perturbación. El sensor 41, el sensor 45 de flujo másico y la parte 46 de inyección de perturbación están en cada caso conectados y controlados por un controlador (no mostrado), que puede funcionar tal como se ha descrito más arriba en relación con el controlador 10.

10 El circuito de flujo simplemente proporciona un aparato de prueba conveniente para permitir que el flujo del material 44 sea estudiado por el sensor 41, proporcionando el sensor 45 de flujo másico una medición independiente del caudal másico promedio con fines de calibración y validación. Sin embargo, se entenderá que dicho sensor 41 se puede desplegar en cualquier número de entornos de procesamiento industrial en los que un material fluye dentro de tuberías. Es decir, si bien el circuito de flujo ilustrado es un sistema cerrado, no es necesario que esto sea así. Además, el sensor 45 de flujo másico se puede omitir en entornos de procesamiento industrial. Se entenderá que, durante el uso, se puede utilizar un sensor 41 para determinar propiedades de cualquier material que se transporte dentro de una tubería.

20 La parte 46 de inyección de perturbación permite crear una perturbación de resistividad (por ejemplo, un trazador o una perturbación térmica), lo que permite realizar mediciones de velocidad dentro de materiales por lo demás homogéneos. La parte 46 de inyección de perturbación está dispuesta para inyectar un elemento trazador (por ejemplo, material calentado) en el circuito de flujo aguas arriba del sensor 41, tal como se muestra mediante la flecha 47.

25 El sensor 41 comprende una porción de tubería dentro del circuito de flujo y está configurado de modo que tiene dos primeros conjuntos ordenados 48a, 48b lineales, y dos segundos conjuntos ordenados 49a, 49b lineales. Los primeros y segundos conjuntos ordenados 48a, 48b y 49a, 49b son en general tal como se ha descrito más arriba con referencia a los conjuntos ordenados 6 y 7. Cada uno de los pares de conjuntos ordenados 48a, 48b y 49a, 49b comprende un conjunto ordenado 48a, 49a aguas arriba y un conjunto ordenado 48b, 49b aguas abajo previstos en la pared lateral del sensor 41. Tanto una fuente de corriente (no mostrada) como un monitor de tensión (tampoco mostrado) están conectados y controlados por el controlador y están dispuestos para controlar y monitorizar excitaciones de los conjuntos ordenados 48a, 48b, 49a, 49b. Las mediciones se realizan con los conjuntos ordenados 48a, 48b, 49a, 49b tal como se ha descrito más arriba con referencia a las Figuras 1 y 2.

30 Los primeros conjuntos ordenados 48a, 48b se pueden designar como conjuntos ordenados de campo lejano, y juntos se pueden designar como un sensor 48 de campo lejano. Del mismo modo, los segundos conjuntos ordenados 49a, 49b se pueden designar como conjuntos de campo cercano, y juntos se pueden designar como un sensor 49 de campo cercano.

35 En algunas realizaciones, la separación entre los dos primeros conjuntos ordenados 48a, 48b lineales es adecuadamente de 45 mm. Los primeros conjuntos ordenados 48a, 48b lineales pueden tener aproximadamente 35 mm de longitud. La separación entre los dos segundos conjuntos ordenados 49a, 49b lineales es adecuadamente de 18 mm. Los segundos conjuntos ordenados 49a, 49b lineales pueden tener aproximadamente 8 mm de longitud. El diámetro del sensor 41 es adecuadamente de 25,4 mm. El campo de visión efectivo de los primeros conjuntos ordenados 48a, 48b lineales puede ser, por ejemplo, de 12 mm desde la pared del sensor 41 (es decir, desde la superficie de los conjuntos ordenados 48a, 48b). El campo de visión efectivo de los segundos conjuntos ordenados 49a, 49b lineales puede ser, por ejemplo, de 3 mm desde la pared del sensor 41 (es decir, de la superficie de los conjuntos ordenados 49a, 49b).

45 El sensor 41 puede estar configurado para recopilar datos a una velocidad de marco de, por ejemplo, 1.275 marcos por segundo. En algunas realizaciones, el sensor 41 puede estar configurado para recopilar datos a una velocidad de marco de, por ejemplo, 630 marcos por segundo, estando basado cada marco en un promedio de dos muestras.

Por supuesto, se entenderá que diferentes geometrías de sensores y electrodos, y tasas de recopilación de datos, serán apropiadas en diferentes condiciones y para su uso con diferentes materiales.

50 Las tuberías 42 pueden tener un diámetro diferente al del sensor 41. Por ejemplo, las tuberías 42 pueden tener un diámetro de 38,1 mm. Cuando sea apropiado, se pueden usar conectores de ajuste de diámetro para conectar tuberías de diferentes diámetros entre sí o con el sensor 41 o la parte 46 de inyección de perturbación.

55 En términos generales, se entenderá que, mediante la recopilación de datos de los dos pares de conjuntos ordenados 48a, 48b y 49a, 49b en una pluralidad de momentos, es posible observar cambios en la distribución de la resistividad del material en regiones adyacentes a los respectivos conjuntos ordenados en la respectiva pluralidad de momentos. Las Figuras 9a y 9b ilustran datos recopilados por dicha disposición. Por ejemplo, usando los conjuntos ordenados 48a, 48b y 49a, 49b en las posiciones P1 y P2, respectivamente, se recopilan datos de resistividad durante un primer período de tiempo T1 tal como se ha descrito más arriba, y se genera un gráfico de resistividad. La Figura 9a ilustra

gráficos de resistividad basados en datos recopilados durante el período de tiempo T1 por los conjuntos ordenados 48a, 48b y 49a, 49b en las posiciones P1 y P2. Tal como se ha descrito más arriba, se entenderá que no es necesario utilizar sensores 48, 49 de campo cercano y de campo lejano para generar dichos datos, sino que simplemente se pueden recopilar datos relacionados con cada una de las regiones P1 y P2.

5 Luego, durante un segundo período de tiempo T2, después del primer período de tiempo T1, de nuevo se recopilan datos de resistividad utilizando los conjuntos ordenados 48a, 48b y 49a, 49b en las posiciones P1 y P2. De nuevo se generan gráficos de resistividad para las dos posiciones P1 y P2 en función de los datos recopilados. La Figura 9b ilustra gráficos de resistividad basados en datos recopilados en el tiempo T2 por los conjuntos ordenados 48a, 48b y 49a, 49b en las posiciones P1 y P2.

10 En la posición P1 en la Figura 9a se puede ver que hay una distribución característica de resistividad que corresponde a un pulso localizado de material que tiene una resistividad diferente en el tiempo T1. Es decir, un mapa de resistividad 100 muestra una distribución de resistividad no uniforme, representando un sombreado de mayor densidad una resistividad más alta. En una primera región 100a hacia la esquina inferior izquierda del mapa 100 está presente una región generalmente circular con la resistividad más alta. Ésta está rodeada por las regiones 100b, 100c, 100d, que tienen una resistividad gradualmente más baja. El resto del mapa 100 comprende una región 100e, que tiene una resistividad más baja. Por otro lado, como se puede ver, en la posición P2 en la Figura 9a no hay características presentes, lo que indica una resistividad generalmente uniforme dentro del material en la posición P2 en el tiempo T1. Es decir, un mapa 200 de resistividad muestra una distribución de resistividad uniforme en la que una sola región 200a con sombreado de densidad constante representa una resistividad constante. El pulso observado en la posición P1 puede estar creado, por ejemplo, por inyección de material de resistividad inferior o superior (por ejemplo, una parte de material que se ha calentado) aguas arriba de las posiciones P1 y P2.

Considerando la Figura 9b, la situación se invierte. Es decir, como se puede ver, en la posición P1 en la Figura 9b no hay características presentes, lo que indica una resistividad generalmente uniforme dentro del material en la posición P1 en el tiempo T2. Es decir, un mapa 300 de resistividad muestra una distribución de resistividad uniforme en la que una sola región 300a con sombreado de densidad constante representa una resistividad constante. Por otro lado, como se puede ver, en la posición P2 en la Figura 9b hay una distribución de resistividad característica que corresponde a un pulso localizado de material que tiene una resistividad diferente en la posición P2 en el tiempo T2. Es decir, un mapa de resistividad 400 muestra una distribución de resistividad no uniforme con un sombreado de mayor densidad que representa una resistividad más alta. En una primera región 400a hacia la esquina inferior izquierda del mapa 400 está presente una región generalmente circular con la resistividad más alta. Ésta está rodeada por regiones 400b, 400c, 400d que tienen una resistividad gradualmente más baja. El resto del mapa 400 comprende una región 400e, que tiene la resistividad más baja. Además, la distribución de resistividad característica que corresponde al pulso localizado de material tiene una forma similar en las regiones 100 y 400. Es decir, el material en la posición P1 en el tiempo T1 se ha movido para estar en la posición P2 en el tiempo T2.

35 Además, conociendo la separación física entre las posiciones P1 y P2 y la separación temporal entre T1 y T2, es posible calcular el caudal del material. Además, mediante el uso de técnicas de correlación cruzada, es posible asignar diferentes caudales dentro de las subregiones de los mapas 100, 200, 300, 400 de resistividad o, al considerar el sistema físico, es posible asignar diferentes caudales dentro de las subregiones de la tubería.

Las Figuras 10a y 10b muestran ejemplos de caudales calculados en varias posiciones dentro de la tubería sobre la base de los datos ilustrados en las Figuras 9a y 9b. En ambas Figuras 10a y 10b se puede ver que hay un caudal (eje "x") asociado con una serie de posiciones (eje "y") dentro de la tubería. Cada una de las posiciones en el eje "y" corresponde a una posición vertical en cada una de las Figuras 9a y 9b. Se entenderá que mediante el procesamiento de los datos asociados con los diversos mapas de resistividad mostrados en las Figuras 9a y 9b es posible generar datos indicativos de la velocidad del material que fluye dentro de la tubería en varias posiciones y en diversos momentos.

En particular, la Figura 10a muestra datos calculados sobre la base de la salida de los conjuntos ordenados 48a, 48b de electrodos, es decir, datos de campo lejano o material dentro del centro de la tubería (es decir, lejos de los conjuntos ordenados 48a, 48b). La Figura 10b, por otro lado, muestra datos calculados sobre la base de la salida de los conjuntos ordenados 49a, 49b de electrodos, es decir, datos de campo cercano o material adyacente a la pared de la tubería. En las Figuras 10a y 10b se puede ver que el caudal (velocidad) aumenta gradualmente a medida que aumenta la distancia desde la pared de la tubería.

La Figura 11 muestra un gráfico ejemplar de la resistividad de material medida (eje "y") en una subregión particular dentro de la tubería (por ejemplo, a una distancia predeterminada de la pared de la tubería), medida en diferentes ubicaciones (por ejemplo, P1 y P2) durante un tiempo prolongado. El eje "x" representa el tiempo, con datos relativos a 20.000 lecturas ilustrados dentro del gráfico. Los valores de resistividad se normalizan a 1 para mostrar cambios relativos. Se puede ver que para los datos recopilados en ambas ubicaciones existe un pulso en la resistividad alrededor del tiempo 10.000, que luego decae. Sin embargo, como se puede ver más claramente en la Figura insertada, existe un retardo de tiempo apreciable entre los pulsos. Ese retardo de tiempo representa el tiempo que tarda el material en la subregión particular de la tubería para desplazarse desde la primera ubicación P1 hasta la segunda ubicación P2.

Tal como se ha descrito más arriba con referencia a las Figuras 7a y 7b, considerando el retardo de tiempo y cualquier cambio en la forma del pulso es posible generar datos indicativos de la velocidad del material que fluye en varias subregiones dentro del sensor 41.

- 5 En términos generales, el material que fluye dentro de una tubería o dentro de una región de interés (por ejemplo, un recipiente de mezcla) puede presentar normalmente una distribución de flujo particular y repetible. Como tal, puede ser posible generar una distribución de flujo modelo que represente el flujo. Además, puede ser posible comparar datos relacionados con la velocidad de flujo derivada de mediciones de resistividad (tal como se ha descrito más arriba) con una distribución de flujo modelo para determinar diversas características de un material o el flujo de material. La distribución de flujo modelo se puede designar como datos de referencia.
- 10 Por ejemplo, se puede generar una distribución de flujo modelo basada en el flujo medido de un material conocido bajo condiciones de flujo conocidas. Se puede considerar que dicha distribución de flujo modelo representa condiciones de flujo o propiedades del material óptimas. Como tal, cualquier desviación de esta distribución de flujo modelo se puede considerar como una evidencia de desviación de las condiciones de flujo o propiedades del material óptimas, y se pueden emprender medidas correctivas (o al menos una acción de investigación).
- 15 Dicho enfoque puede permitir el uso de datos de resistividad relacionados con una amplia variedad de materiales (que pueden consistir o no en un material newtoniano) para monitorizar y controlar las condiciones de flujo. Es decir, el uso de una distribución de flujo modelo no requiere necesariamente que el material siga un modelo físico conocido. Más bien, la distribución de flujo modelo se puede basar en datos determinados empíricamente, o simplemente se puede basar en datos que se sabe que representan una condición de flujo deseable (o incluso no deseable).
- 20 Por otro lado, cuando un material sigue un modelo físico conocido, éste se puede usar para generar una distribución de flujo modelo. Por ejemplo, se sabe que un fluido newtoniano que fluye dentro de una tubería con sección transversal circular en condiciones de flujo laminar monofásico presenta un comportamiento coherente con la ecuación de Poiseuille (1):

$$v = \frac{1}{4\eta} \cdot \frac{dP}{dL} \cdot [R^2 - r^2] \quad (1),$$

25 en la que:

v es la velocidad local del material,

dP/dL es la tasa de cambio de presión a lo largo de la longitud de la tubería,

R es el radio de la tubería,

r es la distancia desde el eje central de la tubería, y

30 η es la viscosidad dinámica del fluido.

Además, cuando se conoce la distribución de velocidad de un material que fluye dentro de una tubería, se puede obtener un promedio de velocidad efectiva V_{eff} reorganizando la ecuación (1) tal como se muestra más abajo. Por ejemplo, si se supone que la velocidad media efectiva V_{eff} es igual a la mitad de la velocidad máxima (es decir, la velocidad en el centro de la tubería), la viscosidad dinámica η del fluido se puede obtener mediante la siguiente relación:

$$\eta = \frac{1}{8V_{eff}} \cdot \frac{dP \cdot R^2}{dL} \quad (2),$$

Es decir, cuando se sabe que una distribución de flujo consiste en un flujo laminar monofásico, el conocimiento de la velocidad media se puede utilizar para obtener una estimación de la viscosidad dinámica del fluido. Se entenderá que dicha información puede ser relevante para controlar las condiciones de proceso del material. Por ejemplo, cuando se obtienen datos que indican que la viscosidad de un material es demasiado baja (es decir, el material está demasiado diluido), es posible modificar una condición de procesamiento para aumentar la viscosidad. Por el contrario, cuando se obtienen datos que indican que la viscosidad de un material es demasiado alta (es decir, el material es demasiado espeso), es posible modificar una condición de procesamiento para reducir la viscosidad.

Se entenderá que las ecuaciones anteriores son aplicables solo para un flujo laminar monofásico en fluidos newtonianos. Cuando se usan fluidos no newtonianos, se pueden requerir modelos alternativos.

Además, cuando se utiliza un modelo de distribución de flujo (ya sea determinado empíricamente o modelado físicamente), es posible ajustar el modelo a puntos de datos medidos. Dicho procesamiento permite utilizar las características del modelo para generar datos relacionados con el flujo de material, incluso cuando no hay mediciones directas disponibles.

Por ejemplo, cuando hay disponibles datos de velocidad en varias ubicaciones dentro de una tubería, puede ser posible reconstruir un modelo de flujo completo y estimar el caudal volumétrico sobre la base de un pequeño número de puntos de datos. Por ejemplo, cuando se observa un tipo particular de distribución de flujo, puede ser posible poner a escala un modelo para que se ajuste a los datos medidos.

- 5 De manera similar, cuando es deseable una distribución de flujo particular (por ejemplo, un flujo laminar), puede ser posible determinar si el flujo laminar está presente haciendo un número relativamente pequeño de mediciones para determinar si los puntos de datos medidos se ajustan al modelo.

De manera más general, al generar una relación entre datos de flujo medidos y datos de referencia, es posible determinar información con respecto al flujo (por ejemplo, si el flujo es o no laminar, o si la viscosidad del material cumple un criterio predeterminado). Además, aunque los ejemplos dados más arriba se refieren a fluidos newtonianos, las técnicas descritas en la presente memoria generalmente son aplicables tanto a fluidos newtonianos como a fluidos no newtonianos.

Además, aunque en algunos casos puede ser posible determinar información relacionada con la reología de un material (por ejemplo, la viscosidad), que se puede verificar mediante mediciones independientes, las técnicas descritas en la presente memoria tienen generalmente la intención de proporcionar parámetros reológicos que ofrezcan información indicativa, más que valores exactos. Es decir, los datos experimentales obtenidos tal como se describe en la presente memoria pueden ser de uso particular para detectar cambios dentro de un régimen de flujo, o para proporcionar una comparación entre condiciones de flujo durante diferentes períodos de tiempo, en lugar de proporcionar una medición exacta de una propiedad de material o característica de flujo particular (por ejemplo, viscosidad). Por ejemplo, se puede considerar que un parámetro reológico obtenido representa una viscosidad efectiva (es decir, el parámetro reológico obtenido es indicativo de la viscosidad, en lugar de ser igual a la viscosidad).

Tal como se ha descrito más arriba para los fluidos newtonianos, un perfil de velocidad de flujo se puede ajustar a un modelo (tal como el descrito por la ecuación (1)), lo que permite obtener parámetros reológicos. Sin embargo, mientras que un fluido newtoniano puede tener un solo valor de viscosidad, la viscosidad de un fluido no newtoniano variará con el esfuerzo y el caudal. Como tal, en lugar de ajustar un solo perfil de velocidad de flujo a un modelo, se pueden obtener varios perfiles de velocidad de flujo para diferentes caudales globales, y los datos obtenidos se pueden usar para derivar una medida de reología.

Tal como se ha descrito más arriba, el aparato 40 se usa para recopilar datos experimentales, algunos de los cuales se describen ahora con más detalle. El material 44 utilizado para fines de prueba tiene una densidad de 1,03 kg/litro, una conductividad de 30 mS/cm y una viscosidad de 6 Pa.s (6.000 centipoises) a una temperatura de 30 °C. La bomba 43 se controla para operar a velocidades de 30, 40 o 40 revoluciones por minuto, que corresponden a velocidades medias de flujo de material de 0,1 m/s, 0,15 m/s y 0,18 m/s, respectivamente, de acuerdo con la determinación realizada por el sensor 45 de flujo másico. La parte 46 de inyección de perturbación está dispuesta para inyectar 10 ml de material calentado en el circuito de flujo aguas arriba del sensor 41, tal como se muestra mediante la flecha 47.

35 Tal como se ha descrito más arriba, el sensor 41 está configurado para recopilar datos a una velocidad de marco de por ejemplo 1.275 marcos por segundo. Los siguientes resultados experimentales se generan sobre la base de una señal de corriente que se inyecta en los electrodos con una frecuencia de 10 kHz y una amplitud pico-pico de 10 V.

La Figura 12a ilustra datos de velocidad de flujo generados sobre la base de datos de resistividad recopilados por el sensor 41 en una primera condición de flujo tanto de los primeros como de los segundos conjuntos ordenados 48a, 48b, 49a, 49b. El flujo de material se controló para tener un caudal medio de 0.1 m/s, con la bomba 43 funcionando a 30 rpm, proporcionando un caudal másico de 200 kg/h. Los datos ilustrados son un promedio de cinco pruebas realizadas utilizando las mismas condiciones de flujo.

Se muestra una distribución 50 de flujo laminar modelo en la que cada una de las barras muestra la velocidad del flujo en una ubicación vertical dentro del sensor 41.

45 La región 51 ilustra datos derivados del sensor 49 de campo cercano (es decir, los conjuntos ordenados 49a, 49b) y comprende barras 52 de datos, cada una de las cuales muestra la velocidad del flujo (eje "x") en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41 en la región adyacente a la pared (es decir, en el campo cercano).

La región 53 ilustra datos derivados del sensor 48 de campo lejano (es decir, los conjuntos ordenados 48a, 48b) y comprende barras 54 de datos, cada una de las cuales muestra la velocidad del flujo (eje "x") en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41 hacia el centro de la tubería (es decir, en el campo lejano).

Se puede ver que los primeros conjuntos ordenados 48a, 48b (es decir, el sensor 48 de campo lejano) proporcionan información sobre el caudal a una mayor profundidad en el sensor 41 que los segundos conjuntos ordenados 49a, 49b (es decir, el sensor 49 de campo cercano).

55 La distribución 50 de flujo representa una distribución de flujo laminar modelo dentro del sensor 41, que se puede poner a escala para que se ajuste a las barras 52, 54 de datos obtenidas de los sensores 49, 48 de campo cercano y de campo lejano, respectivamente. Se puede ver que, en la distribución 50 de flujo laminar modelo, el caudal es más

rápido en el centro del sensor 41 y más lento en las paredes laterales. Además, se puede ver que las barras 52, 54 de datos se ajustan en general a la distribución 50 modelo puesta a escala.

5 La Figura 12b ilustra datos de velocidad de flujo generados sobre la base de datos de resistividad recopilados por el sensor 41 en una segunda condición de flujo tanto de los primeros como de los segundos conjuntos ordenados 48a, 48b, 49a, 49b. El flujo de material se controló para que tuviera un caudal medio de 0,15 m/s, con la bomba 43 funcionando a 40 rpm, proporcionando un caudal másico de 280 kg/h. Los datos ilustrados son un promedio de cinco pruebas realizadas utilizando las mismas condiciones de flujo.

Se muestra una distribución 55 de flujo laminar modelo en la que cada una de las barras muestra la velocidad del flujo en una ubicación vertical dentro del sensor 41.

10 La región 56 ilustra datos derivados del sensor 49 de campo cercano (es decir, los conjuntos ordenados 49a, 49b) y comprende barras 57 de datos, cada una de las cuales muestra la velocidad de flujo (eje "x") en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41 en la región adyacente a la pared (es decir, en el campo cercano).

15 La región 58 ilustra datos derivados del sensor 48 de campo lejano (es decir, los conjuntos ordenados 48a, 48b) y comprende barras 59 de datos, cada una de las cuales muestra la velocidad de flujo (eje "x") en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41 hacia el centro de la tubería (es decir, en el campo lejano).

Además, se puede ver que las barras 57, 59 de datos se ajustan en general a la distribución 55 modelo puesta a escala.

20 La Figura 12c ilustra los datos de velocidad de flujo generados sobre la base de datos de resistividad recopilados por el sensor 41 en una tercera condición de flujo tanto de los primeros como de los segundos conjuntos ordenados 48a, 48b, 49a, 49b. El flujo de material se controló para que tuviera un caudal medio de 0,18 m/s, con la bomba 43 funcionando a 50 rpm, proporcionando un caudal másico de 360 kg/h. Los datos ilustrados son un promedio de cinco pruebas realizadas utilizando las mismas condiciones de flujo.

Se muestra una distribución 60 de flujo laminar modelo en la que cada una de las barras muestra la velocidad del flujo en una ubicación vertical dentro del sensor 41.

25 La región 61 ilustra datos derivados del sensor 49 de campo cercano (es decir, los conjuntos ordenados 49a, 49b) y comprende barras 62 de datos, cada una de las cuales muestra la velocidad del flujo (eje "x") en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41 en la región adyacente a la pared (es decir, en el campo cercano).

30 La región 63 ilustra datos derivados del sensor 48 de campo lejano (es decir, los conjuntos ordenados 48a, 48b) y comprende barras 64 de datos, cada una de las cuales muestra la velocidad del flujo (eje "x") en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41 hacia el centro de la tubería (es decir, en el campo lejano). Se puede ver que las barras 62, 64 de datos se ajustan en general a la distribución 60 modelo puesta a escala.

35 Las Figuras 13a a 13c proporcionan un resumen de los datos mostrados en las Figuras 12a a 12c, respectivamente. Más detalladamente, la Figura 13a es un gráfico del perfil de flujo obtenido en la primera condición de flujo (caudal medio 0,1 m/s), en el que la velocidad del flujo (eje "x") en m/s está representada en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41.

40 Los puntos 65 de datos representan las barras 52, 54 de datos mostradas en la Figura 12a. Además, aunque los datos únicamente se recopilan desde un solo lado del sensor 41, los datos se reflejan en el gráfico de la Figura 13a, suponiendo una distribución de flujo simétrica dentro del sensor 41. La línea 66 representa una línea de mejor ajuste de los puntos 65 de datos, y es representativa de un perfil de velocidad de flujo medido. Una línea 67 representa un perfil de velocidad de flujo teórico calculado sobre la base de la ecuación de Poiseuille (1) puesta a escala para que se ajuste a los puntos 65 de datos.

Tomar un caudal medio para los datos indicados por la línea 66 da como resultado un caudal medio de 0,10645 m/s. Esto se corresponde estrechamente con el caudal de 0,1 m/s, lo que confirma la precisión de los datos medidos.

45 La Figura 13b es un gráfico del perfil de flujo obtenido en la segunda condición de flujo (caudal medio 0,15 m/s), en el que está trazada la velocidad del flujo (eje "x") en m/s en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41.

50 Los puntos 70 de datos representan las barras 57, 59 de datos mostradas en la Figura 12b. Tal como se ha descrito más arriba, aunque los datos únicamente se recopilan desde un solo lado del sensor 41, los datos se reflejan en el gráfico de la Figura 13b, suponiendo una distribución de flujo simétrica dentro del sensor 41. La línea 71 representa una línea de mejor ajuste de los puntos 70 de datos, y es representativa de un perfil de velocidad de flujo medido. Una línea 72 representa un perfil de velocidad de flujo teórico calculado sobre la base de la ecuación de Poiseuille (1) puesta a escala para que se ajuste a los puntos 70 de datos.

Tomar un caudal medio para los datos indicados por la línea 71 da como resultado un caudal medio de 0,149 m/s. Esto corresponde estrechamente con el caudal de 0,15 m/s, lo que confirma de nuevo la precisión de los datos medidos.

La Figura 13c es un gráfico del perfil de flujo obtenido en la tercera condición de flujo (caudal medio 0,18 m/s), en el que está trazada la velocidad del flujo (eje "x") en m/s en varias posiciones (eje "y") dentro del sensor 41.

5 Los puntos 75 de datos representan las barras 62, 64 de datos mostradas en la Figura 12c. Tal como se ha descrito más arriba, aunque los datos únicamente se recopilan desde un solo lado del sensor 41, los datos se reflejan en el gráfico de la Figura 13c, suponiendo una distribución de flujo simétrica dentro del sensor 41. La línea 76 representa una línea de mejor ajuste de los puntos 75 de datos, y es representativa de un perfil de velocidad de flujo medido. Una línea 77 representa un perfil de velocidad de flujo teórico sobre la base de la ecuación de Poiseuille (1) puesta a escala para que se ajuste a los puntos 75 de datos.

10 Tomar un caudal medio para los datos indicados por la línea 76 da como resultado un caudal medio de 0,1916 m/s. Esto se corresponde en general con el caudal de 0,18 m/s, lo que confirma de nuevo la precisión de los datos medidos

15 En general, a partir de los datos representados por las Figuras 12a a 12c y 13a a 13c, se puede entender que las técnicas arriba descritas permiten que se entienda la distribución del flujo dentro del sensor. Se entenderá que, si bien puede haber alguna desviación con respecto a la distribución de flujo modelada, es posible generar una estimación del caudal medio a partir de los datos obtenidos de los conjuntos ordenados 48a, 48b, 49a, 49b de electrodos, que, tal como se ha descrito más arriba, corresponde en general a los caudales medios medidos por un sensor de flujo másico independiente. Además, el uso de los primeros y segundos conjuntos ordenados 48a, 48b, 49a, 49b permite obtener información detallada sobre las regiones de campo lejano y cercano (es decir, a diferentes profundidades).

20 Se ha de señalar que, en algunos casos, las condiciones de flujo no se consideran estrictamente laminares. Por ejemplo, cuando se ve que la forma de un pulso de trazador cambia entre una primera y una segunda ubicación de detección, se entenderá que el flujo puede no ser completamente laminar. Además, se puede entender que varios factores pueden dar como resultado condiciones no ideales para desarrollar un flujo laminar. Por ejemplo, cambios en el diámetro de la tubería (por ejemplo, de la tubería 42 con 37,1 mm de diámetro al sensor 41 con 25,4 mm de diámetro), estando previsto el sensor 41 cerca de las curvas en las tuberías 42, y también la inyección de un material trazador en la parte 46 de inyección de perturbación puede contribuir a condiciones de flujo no ideales.

25 A partir de los datos recopilados en cada condición de flujo, también es posible determinar una viscosidad dinámica tal como se ilustra más arriba con referencia a la relación (2). Dicha información se puede usar para variar y controlar las condiciones del proceso.

30 Además, a partir de los datos recopilados en cada condición de flujo, también es posible determinar una caída de presión dentro del material. La caída de presión se puede estimar, por ejemplo, mediante el uso de la ecuación de Darby-Weisbach. Dicha estimación se puede basar en la suposición de que la superficie de la tubería es completamente lisa (es decir, que no hay fricción en las paredes de la tubería). La información sobre la caída de presión puede permitir obtener información adicional sobre las condiciones de flujo o las propiedades del material.

35 Además, a partir de las distribuciones de flujo medidas se puede derivar información relacionada con el esfuerzo de cizalladura y/o el ángulo de cizalladura dentro del material. Por ejemplo, el ángulo de cizalladura se puede determinar sobre la base del ángulo entre la distribución de flujo y la pared de tubería en la pared de la tubería. Entonces es posible calcular un módulo de cizalladura del material que fluye sobre la base del ángulo de cizalladura determinado.

Si bien en esta configuración experimental se conocen las velocidades de flujo y los caudales másicos nominales o medios (en virtud del sensor 45 de flujo másico), se entenderá que el sensor 41 se puede usar en un entorno en el que no se conocen dichos parámetros con el fin de monitorizar y controlar diversos parámetros de proceso.

40 La Figura 14 ilustra un procesamiento que puede ser llevado a cabo por un controlador de proceso para modificar parámetros del proceso sobre la base de mediciones obtenidas por el sensor 41. El controlador puede ser un controlador tal como se ha descrito más arriba con referencia a la Figura 3, y además está conectado de forma operativa a un sistema de control industrial.

45 El procesamiento comienza en la etapa S10, en la que durante un primer período de tiempo se obtienen datos de conductividad relacionados con la conductividad del material 44 adyacente al conjunto ordenado 48a de electrodos. Los datos obtenidos adoptan la forma de un conjunto de valores de conductividad, cada uno asociado con una subregión dentro del sensor 41 adyacente al conjunto ordenado 48a de electrodos, por ejemplo, tal como se muestra en las Figuras 9a, 9b.

50 El procesamiento pasa después a la etapa S11, en la que durante un segundo período de tiempo se obtienen datos de conductividad relacionados con la conductividad del material 44 adyacente al conjunto ordenado 48b de electrodos. Los datos obtenidos adoptan la forma de un conjunto de valores de conductividad, cada uno asociado con una subregión dentro del sensor 41 adyacente al conjunto ordenado 48b de electrodos, de nuevo tal como se muestra en las Figuras 9a, 9b.

55 El procesamiento pasa después a la etapa S12, en la que los datos obtenidos se procesan para comparar los datos de conductividad asociados con el material adyacente a los dos conjuntos ordenados 48a, 48b de electrodos. Se tiene en cuenta la separación física entre los dos conjuntos ordenados 48a, 48b de electrodos y la separación temporal

entre el primer y el segundo períodos de tiempo. El procesamiento en la etapa S12 genera como salida una distribución de flujo que indica la velocidad de flujo de material en varias posiciones dentro del sensor 41, y representa un promedio de la velocidad de flujo entre los conjuntos ordenados 48a, 48b. En la Figura 10a se muestra un ejemplo de distribución de flujo.

5 El procesamiento pasa después a la etapa S13, en la que se obtienen datos de referencia indicativos de una distribución de flujo predeterminada. Dichos datos de referencia pueden adoptar, por ejemplo, la forma de una distribución de flujo laminar modelo, tal como se muestra mediante la distribución 50 de flujo en la Figura 12. Por ejemplo, los datos de referencia pueden corresponder a una distribución de flujo predeterminada y/o a un caudal medio predeterminado.

10 El procesamiento pasa después a la etapa S14, en la que los datos de referencia se comparan con los datos de distribución de flujo generados en la etapa S13. Se generan datos indicativos de una relación entre los datos de referencia y los datos de distribución de flujo. El procesamiento puede comprender, por ejemplo, la generación de un parámetro de ajuste o un parámetro de puesta a escala que indique en qué medida (o de otro modo) coinciden los datos de distribución de flujo con los datos de referencia.

15 El procesamiento pasa después a la etapa S15, en la que los datos indicativos de la relación se comparan con un criterio predeterminado. Por ejemplo, el criterio predeterminado puede consistir en un valor con el que se compara el parámetro de ajuste o puesta a escala, y que se considera indicativo de una coincidencia aceptable entre los datos de distribución de flujo y los datos de referencia. Por ejemplo, la comparación puede determinar si el caudal de material coincide o no con un caudal predeterminado, o si está dentro de límites predeterminados, o si tiene una distribución (por ejemplo, una forma) predeterminada.

Si se considera que los datos de distribución de flujo son aceptables, el procesamiento vuelve a la etapa S10, en la que se obtienen más datos de conductividad.

25 Sin embargo, si los datos de distribución de flujo no se consideran aceptables, el procesamiento pasa a la etapa S16, en la que se ajusta un parámetro de proceso. Por ejemplo, el ajuste puede comprender un aumento de la velocidad de bomba para aumentar el caudal del material. El procesamiento vuelve después a la etapa S10, en la que se obtienen de nuevo datos de conductividad adicionales.

30 Se entenderá que el procesamiento descrito con referencia a la Figura 14 es un ejemplo simple de un proceso de material controlado mediante el uso de datos de conductividad obtenidos por conjuntos ordenados de electrodos dispuestos a lo largo de la dirección del flujo de material tal como se describe en la presente memoria. El procesamiento descrito se puede modificar de varias maneras. Por ejemplo, además de la adquisición de datos descrita con referencia a las etapas S10 y S11, se pueden obtener datos adicionales de otros conjuntos ordenados de electrodos (por ejemplo, conjuntos ordenados 49a, 49b de campo cercano) y cualquiera de estos datos se puede combinar con los obtenidos de los conjuntos ordenados 48a, 48b de electrodos para generar una distribución de flujo más detallada.

35 Además, se entenderá que los datos obtenidos en las etapas S10 y S11 se pueden obtener de un único conjunto ordenado de electrodos durante diferentes períodos de tiempo.

40 Además, el procesamiento en la etapa S14 para generar datos indicativos de una relación entre los datos de referencia y los datos de distribución de flujo se puede modificar para generar datos indicativos de propiedades del material tales como, por ejemplo, la viscosidad. En dicho ejemplo, la comparación en la etapa S15 puede determinar si la viscosidad del material cumple con un criterio predeterminado y, en caso negativo, se pueden hacer cambios apropiados en las condiciones de proceso.

Más generalmente, el procesamiento en la etapa S14 para generar datos indicativos de una relación entre los datos de referencia y los datos de distribución de flujo se puede modificar para generar datos indicativos de cualquier propiedad del material que esté relacionada con la reología del material.

45 Durante el uso, los electrodos que no se utilizan como un electrodo de excitación o un electrodo de monitor se dejan flotando, para no interferir en las mediciones en curso. Sin embargo, en algunas realizaciones se pueden prever electrodos de tierra adicionales que actúan aislando la región del material que influye en las mediciones. Por ejemplo, se puede prever un conjunto ordenado de ocho electrodos con un electrodo adicional en cada extremo del conjunto ordenado, que sirve como un electrodo de tierra. En el ejemplo dado más arriba se proporciona un conjunto ordenado
50 lineal de diez electrodos en el que los electrodos de cada extremo están conectados a tierra, mientras que los ocho electrodos centrales se usan como electrodos de excitación y de monitor.

En las realizaciones arriba descritas, generalmente se usan dos grupos de conjuntos ordenados de electrodos, en concreto un grupo de conjuntos ordenados de electrodos de campo lejano (por ejemplo, conjuntos ordenados 48a y 48b de electrodos tal como se ha descrito más arriba con referencia a la Figura 8) y un grupo de conjuntos ordenados de electrodos de campo cercano (por ejemplo, conjuntos ordenados 49a y 49b de electrodos). Sin embargo, se entenderá que se pueden usar más de dos grupos de conjuntos ordenados de electrodos en el sensor 41.

La Figura 15 ilustra un sensor 41', que es una realización alternativa del sensor 41 de la Figura 8. El sensor 41' se puede usar, por ejemplo, en el aparato 40 de prueba de la Figura 8 para reemplazar el sensor 41 en el mismo. Tal como se muestra en la Figura 15, el sensor 41' comprende una parte de tubería 79, que puede estar dentro del circuito de flujo del aparato 40 para permitir que el material 44 fluya a través del sensor 41'. El sensor 41' tiene dos primeros conjuntos ordenados 82a, 82b lineales de electrodos, dos segundos conjuntos ordenados 80a, 80b lineales de electrodos y dos terceros conjuntos ordenados 81a, 81b lineales de electrodos.

Cada conjunto ordenado de electrodos contiene una pluralidad de electrodos individuales. La separación de los electrodos dentro de los primeros conjuntos ordenados 82a, 82b lineales de electrodos a lo largo (es decir, axialmente) de la dirección en la que se extienden los conjuntos ordenados es mayor que la de los electrodos dentro de los terceros conjuntos ordenados 81a, 81b lineales de electrodos, que a su vez es mayor que la de los electrodos dentro de los segundos conjuntos ordenados 80a, 80b lineales de electrodos. Como resultado de ello, los primeros conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos pueden detectar material a una profundidad mayor que los terceros conjuntos ordenados 81a, 81b de electrodos, que a su vez pueden detectar material a una profundidad mayor que los segundos conjuntos ordenados 80a, 80b de electrodos. Es decir, la profundidad del material 44 desde los primeros conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos que influye significativamente en la medición realizada por los primeros conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos es mayor que la profundidad del material 44 desde los terceros conjuntos ordenados 81a, 81b de electrodos que influye significativamente en las mediciones realizadas por los terceros conjuntos ordenados 81a, 81b de electrodos, que a su vez es mayor que la profundidad del material 44 desde los segundos conjuntos ordenados 80a, 80b de electrodos que influye significativamente en las mediciones realizadas por los segundos conjuntos ordenados 81a, 81b de electrodos.

Por lo tanto, los segundos conjuntos ordenados 80a, 80b de electrodos se pueden designar como conjuntos ordenados de campo cercano, y juntos se pueden designar como un sensor 80 de campo cercano. Los terceros conjuntos ordenados 81a, 81b de electrodos se pueden designar como conjuntos de campo medio, y juntos se pueden designar como sensores 81 de campo medio. Los primeros conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos se pueden designar como conjuntos de campo lejano, y juntos se pueden designar como sensores 82 de campo lejano.

Dentro de los sensores 80, 81 y 82, el sensor 82 de campo lejano proporciona información sobre el caudal del material 44 a la mayor profundidad en el sensor 41', el sensor 80 de campo cercano a la menor profundidad y el sensor 81 de campo medio entre ellos. Por lo tanto, el sensor 82 es sensible en regiones de campo lejano distantes de los electrodos. El sensor 80 es sensible en regiones de campo cercano cerca de los electrodos. El sensor 81 es sensible en regiones de campo medio entre las regiones de campo cercano y las regiones de campo lejano.

Al comparar los resultados de los sensores 41 y 41' se ha comprobado que el aumento los grupos de conjuntos ordenados de electrodos utilizados en el sensor permite obtener datos de medición indicativos de la velocidad del material 44, que representan más exactamente el material dentro del sensor 41'. Esto permite a su vez una estimación más precisa y fiable de un perfil de velocidad del material 44 que fluye a través del sensor 41'.

En un ejemplo, cada uno de los conjuntos ordenados 80a, 80b, 81a, 81b, 82a, 82b de electrodos contiene diez electrodos individuales. Cada uno de los electrodos dentro de los primeros conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos tiene una longitud de 1,80 mm y una separación de 1,89 mm entre los electrodos adyacentes en dirección axial. En consecuencia, la longitud total de cada primer conjunto ordenado 82a, 82b de electrodos es de 35 mm. Cada uno de los electrodos dentro de los segundos conjuntos ordenados 80a, 80b de electrodos tiene una longitud de 0,3 mm y una separación de 0,33 mm entre los electrodos adyacentes en dirección axial (es decir, a lo largo de la dirección del flujo como se muestra en la Figura 15). Por lo tanto, la longitud total de cada segundo conjunto ordenado 80a, 80b de electrodos es de 6 mm. Cada uno de los electrodos dentro del tercer conjunto ordenado 81a, 81b de electrodos tiene una longitud de 0,78 mm y una separación de 0,80 mm entre los electrodos adyacentes en dirección axial. Por consiguiente, la longitud total de cada tercer conjunto ordenado 81a, 81b de electrodos es de 15 mm.

Se entenderá que las dimensiones de los conjuntos ordenados 80a, 80b, 81a, 81b, 82a, 82b de electrodos no están limitadas al ejemplo anterior. Preferiblemente, las dimensiones de los conjuntos ordenados de electrodos se seleccionan sobre la base de la dimensión de la tubería 79. En particular, las separaciones entre electrodos adyacentes dentro de los conjuntos ordenados de electrodos se seleccionan de modo que la sensibilidad de profundidad de los conjuntos ordenados de electrodos pueda, en combinación, alcanzar tanto la región cercana a la pared como la región central de la tubería 79.

Aunque en el ejemplo ilustrado en la Figura 15 se usan tres grupos de conjuntos ordenados de electrodos, se entenderá que, en caso necesario, en el sensor 41' se pueden usar más de tres grupos de conjuntos ordenados de electrodos con diferentes sensibilidades de profundidad. En términos generales, el número de conjuntos ordenados de electrodos usados en una aplicación particular se seleccionará para proporcionar una solución intermedia aceptable entre, por un lado, el espacio requerido para acomodar los conjuntos ordenados de electrodos y la complejidad del procesamiento de la señal asociada con una mayor adquisición de señales, y, por otro lado, el rendimiento de detección mejorado (en términos de resolución y penetración de profundidad) asociado con un mayor número de conjuntos ordenados de electrodos.

Además se entenderá que el uso de más de dos grupos de conjuntos ordenados de electrodos que tienen sensibilidades de profundidad diferentes que cubren un intervalo de profundidades (por ejemplo, desde una región de campo cercano hasta una región de campo lejano) se puede emplear en combinación con cualquiera de las otras técnicas descritas en la presente memoria. Por ejemplo, dicha disposición de sensores se puede usar en un recipiente de mezcla (tal como un recipiente de mezcla descrito más arriba con referencia a las Figuras 6a y 6b).

Cada uno de los conjuntos ordenados 80a, 80b, 81a, 81b, 82a, 82b de electrodos tiene una anchura a lo largo de una dirección circunferencial de la tubería 79 (es decir, una dirección que es perpendicular a la dirección en la que se extienden los conjuntos ordenados, y también perpendicular a la dirección de flujo de material dentro de la tubería 79). En la realización ilustrada en la Figura 15, la anchura de cada conjunto ordenado de electrodos se selecciona de modo que sea igual a la mitad del perímetro circunferencial interior de la tubería 79. Por ejemplo, si el diámetro de la tubería 79 es de 25,4 mm, la anchura de cada conjunto ordenado de electrodos puede ser de alrededor de 39,89 mm. Por lo tanto, todos los conjuntos ordenados 80a, 80b, 81a, 81b, 82a, 82b de electrodos tienen una anchura uniforme a lo largo de una dirección circunferencial de la tubería 79.

Tal como se ha descrito más arriba en relación con la Figura 2, la anchura de los conjuntos ordenados de electrodos no influye directamente en la resolución de medición o en el campo de visión. Además, se ha comprobado que, al aumentar la anchura de los conjuntos ordenados de electrodos a la mitad del perímetro circunferencial interior de la tubería 79, la relación señal/ruido (SNR, por sus siglas en inglés) en los resultados de medición obtenidos mediante el uso de los conjuntos ordenados de electrodos mejora enormemente, tal como se muestra en la Figura 16.

La Figura 16 muestra la conductividad medida (eje "y") del material 44 en una región de campo lejano (es decir, la región central de la tubería 79) medida en los conjuntos ordenados 82a y 82b de electrodos durante un tiempo prolongado. La Figura 16(a) representa las mediciones realizadas donde la anchura de los conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos es igual a aproximadamente 1/5 del perímetro circunferencial interior de la tubería 79. La Figura 16(b) representa las mediciones realizadas donde la anchura de los conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos es igual a aproximadamente 1/2 del perímetro circunferencial interior de la tubería 79. Las mediciones en ambas figuras se realizan de manera similar a la descrita más arriba con referencia a la Figura 11. En particular, el eje "x" representa el tiempo, con datos relacionados con 25.000 lecturas ilustrados dentro del gráfico. Los valores de conductividad se normalizan a 1 para mostrar cambios relativos. La curva identificada como "Plano 1" representa los datos recogidos por el conjunto ordenado 82a de electrodos. La curva identificada como "Plano 2" representa los datos recogidos por el conjunto ordenado 82b de electrodos. El retardo de tiempo entre la curva "Plano 1" y la curva "Plano 2" representa el tiempo que tarda el material 44 en el centro de la tubería en desplazarse desde la región delante del conjunto ordenado 82a de electrodos hasta la región delante del conjunto ordenado 82b de electrodos.

Tal como se muestra en la Figura 16(a), en la que la anchura de los conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos es igual a aproximadamente 1/5 del perímetro interior de la tubería 79, las curvas de conductividad incluyen múltiples picos pequeños superpuestos sobre un pulso principal. Esto indica un alto nivel de ruido y, en consecuencia, una baja SNR en la señal medida. Un nivel de ruido tan alto puede causar imprecisiones al estimar la amplitud real de la señal medida, lo que puede comprometer aún más la precisión en la medición de la velocidad del material 44. En cambio, las curvas de conductividad mostradas en la Figura 16(b) son significativamente más suaves. Esto indica una SNR mejorada en las señales medidas cuando la anchura de los conjuntos ordenados 82a, 82b de electrodos se incrementa a aproximadamente 1/2 del perímetro interior de la tubería 79. Por lo tanto, se entenderá que una SNR mejorada permite medir con mayor precisión la velocidad del material.

En términos generales, se ha descubierto que al aumentar la anchura del electrodo en una medida determinada en una dirección sustancialmente perpendicular al flujo de material más allá de un sensor, se puede obtener una relación señal/ruido mejorada. Sin embargo, la relación entre la anchura de los conjuntos ordenados de electrodos y la SNR no es lineal. Por ejemplo, cuando la anchura de los conjuntos ordenados de electrodos corresponde a una parte sustancial del perímetro de la tubería 79, los aumentos adicionales en la anchura del electrodo pueden dar como resultado un mayor nivel de ruido y, en consecuencia, una SNR más baja. Se entiende que las burbujas de aire arrastradas dentro del material que se está monitorizando pueden influir negativamente en los resultados de medición cuando pasan a través de las regiones alrededor de los electrodos (es decir, las regiones de material sobre las que se realizan mediciones). Cuando la anchura de los electrodos dentro de un conjunto ordenado se incrementa de modo que corresponda a una parte sustancial (por ejemplo, más del 75%) del perímetro de la tubería 79, el ruido en los resultados de medición causado por la interacción de las burbujas de aire arrastradas y los conjuntos ordenados de electrodos puede pesar más que cualquier beneficio proporcionado por la mayor anchura del electrodo, lo que da como resultado una SNR más baja.

Se entenderá que se puede seleccionar una anchura de electrodo apropiada para cada aplicación, o para cada conjunto ordenado, y que en cada caso se encontrará una solución intermedia entre proporcionar una anchura suficientemente grande para mejorar el tamaño del electrodo, sin aumentar la anchura hasta un punto en el que dicho ruido se incremente aún más. Por lo tanto, la anchura óptima del electrodo puede variar entre diferentes aplicaciones. Por ejemplo, en una aplicación en la que se espera que haya una cantidad significativa de aire arrastrado, la anchura del electrodo se puede seleccionar de modo que corresponda a aproximadamente el 40% del perímetro. Por otro lado, en una aplicación en la que se espera que haya una pequeña cantidad de aire arrastrado, la anchura del electrodo se puede seleccionar de modo que corresponda a aproximadamente el 60% del perímetro.

Por lo tanto, se entenderá que cuando se dice que los conjuntos ordenados de electrodos se pueden extender preferiblemente alrededor de la mitad del perímetro de la tubería, significa que los electrodos se pueden extender alrededor de una parte sustancial de una tubería, como por ejemplo más del 20 % del perímetro de una tubería. Más preferiblemente, los electrodos se pueden extender alrededor de más del 40% del perímetro de una tubería.

- 5 Adicional o alternativamente, cuando se indica que los conjuntos ordenados de electrodos se pueden extender preferiblemente alrededor de la mitad del perímetro de una tubería, significa que los electrodos se pueden extender, por ejemplo, alrededor de menos del 75% del perímetro de una tubería. Más preferiblemente, los electrodos se extienden alrededor de menos del 60% del perímetro de una tubería.

- 10 También se entenderá que, para reducir el ruido causado por burbujas de aire arrastradas dentro del material, los conjuntos ordenados de electrodos se ubican preferiblemente hacia la mitad inferior de las tuberías que generalmente se utilizan en posición horizontal. Las burbujas de aire, debido a su baja densidad, tienen más probabilidades de fluir a través de una región superior de una tubería. Al disponer los conjuntos ordenados de electrodos hacia una región inferior de una tubería, las burbujas de aire están separadas de los conjuntos ordenados de electrodos en la mayor medida posible y, en consecuencia, el ruido introducido por las burbujas de aire en los resultados de medición se puede reducir considerablemente.

Por supuesto, se entenderá que se puede producir una perturbación en diferentes partes de una tubería. Por ejemplo, en lugar de burbujas de aire, una perturbación puede estar relacionada con la presencia de sedimento que, como es sabido, se forma en el fondo de la tubería. Por lo tanto, los electrodos pueden estar dispuestos alrededor de una parte predeterminada de una tubería para evitar una fuente de ruido particular.

- 20 Por supuesto, se entenderá que la mayor anchura del electrodo arriba descrita se puede usar en combinación con cualquiera de las realizaciones arriba descritas (por ejemplo, aquellas que solo tienen sensores de campo cercano y de campo lejano).

- 25 Los datos de medición generados por el sensor 41' arriba descrito con referencia a la Figura 15 se pueden procesar, por ejemplo, de forma similar a la explicada más arriba para el sensor 41 en relación con las Figuras 10, 12, 13 y 14, con el fin de estimar un perfil de velocidad de flujo del material 44.

- 30 De forma más detallada, los datos de velocidad de campo cercano, campo medio y campo lejano se pueden calcular sobre la base de las salidas de los sensores 80, 81 y 82 de campo cercano, campo medio y campo lejano, respectivamente. El cálculo de los datos de velocidad se puede llevar a cabo tal como se ha descrito más arriba con referencia a las etapas S10, S11 y S12 de la Figura 14. Sin embargo, se pueden realizar etapas de procesamiento adicionales para proporcionar una correlación mejorada entre un perfil de velocidad de flujo generado y un perfil de velocidad de flujo real.

- 35 En particular, se puede considerar que cada elemento de datos de velocidad generado por los tres sensores 80, 81, 82 representa una velocidad medida dentro de una región particular que tiene una profundidad particular en el sensor 41'. Sin embargo, para asegurar que los datos de velocidad medidos están asociados con la profundidad correcta dentro del sensor 41', los datos de velocidad medidos de los sensores se pueden asignar (o ajustar) a profundidades apropiadas mediante el uso de factores de profundidad predeterminados (tal como se describe más abajo con mayor detalle). Un factor de profundidad es un factor de ajuste relativo que permite poner a escala los datos de medición para que coincidan con las propiedades reales del material.

- 40 Los datos de velocidad obtenidos de cada uno de los sensores 80, 81 y 82 pueden comprender, por ejemplo, nueve mediciones de velocidad que corresponden a capas que ocupan las posiciones uno nueve tal como se muestra en las Figuras 10A o 10B. Cada posición corresponde a una capa, representando la capa que ocupa la posición uno una región que está más cerca de la pared del sensor que la representada por la capa que ocupa la posición nueve. La profundidad de cada capa en el sensor se determina inicialmente en función de una profundidad de penetración esperada del sensor. La profundidad de la capa también puede depender de la geometría del sensor y del algoritmo de reconstrucción de imagen utilizado para generar datos de conductividad a partir de mediciones eléctricas. Sin embargo, los valores de profundidad nominal generados en función de la profundidad de penetración esperada del sensor pueden no ser exactos, y se pueden mejorar utilizando un factor de profundidad predeterminado.

- 50 La Figura 12A ilustra una asignación ejemplar de datos usando valores de profundidad nominal. Por ejemplo, nueve mediciones de velocidad obtenidas de un sensor de campo lejano tal como se muestra en la Figura 10A se pueden asignar a profundidades separadas dentro de un rango de 12 mm desde la pared del sensor tal como se muestra en la Figura 12A. En el ejemplo mostrado en la Figura 12A, las nueve mediciones de velocidad se asignan linealmente a profundidades dentro de este intervalo, lo que indica que los factores de profundidad utilizados para asignar cada capa en este ejemplo son los mismos.

- 55 Es decir, se usa un factor de ajuste de alrededor de tres para el procesamiento arriba descrito con referencia a la Figura 12A, estando las diversas mediciones obtenidas del sensor distribuidas por igual a lo largo de una profundidad de 12 mm, correspondiendo la profundidad de 12 mm a aproximadamente un tercio del longitud del sensor (cuya longitud es de 35 mm).

Sin embargo, en el procesamiento modificado que utiliza un factor de profundidad predeterminado (tal como se describe más abajo con mayor detalle), se puede aplicar un factor de profundidad predeterminado diferente a cada una de las mediciones de velocidad en función de la posición de la capa, de modo que el factor de profundidad predeterminado aplicado a una medición correspondiente a una capa que ocupa la posición uno puede ser diferente al factor de profundidad predeterminado aplicado a una medición correspondiente a una capa que ocupa la posición nueve.

Una vez que se han asignado los datos de velocidad en función de los factores de profundidad predeterminados, se puede considerar que cada uno de los puntos de datos de velocidad representa con precisión una velocidad del material a la profundidad correspondiente. Los datos de velocidad asignados pueden comprender, por ejemplo, una pluralidad de puntos de datos que son equivalentes a los puntos de datos 65, 70 y 75, tal como se muestra en la Figura 13. Posteriormente, los datos de velocidad asignados se pueden ajustar a una curva (como, por ejemplo, las curvas 66, 71 y 76 tal como se muestran en la Figura 13) usando un algoritmo de ajuste adecuado. La curva ajustada representa el perfil de velocidad de flujo medido.

Por lo tanto, en comparación con el uso de un factor de ajuste uniforme (como por ejemplo el valor tres, tal como se ha descrito más arriba con referencia a la Figura 12), el uso de factores de profundidad predeterminados puede mejorar la precisión de cualquier perfil de velocidad de flujo de medición. Para obtener factores de profundidad predeterminados precisos para los datos de velocidad obtenidos de los sensores 80, 81 y 82, se puede realizar un proceso de calibración adicional. Los factores de profundidad predeterminados se pueden determinar empíricamente.

En algunas realizaciones, dicho proceso de calibración puede incluir hacer que un material de referencia que tiene propiedades conocidas (por ejemplo, un fluido newtoniano) fluya a través del sensor 41' en condiciones de flujo controlado con un perfil de flujo que corresponde a un perfil de flujo de referencia. El perfil de flujo de referencia puede ser conocido o se puede estimar en función de los parámetros de las condiciones de flujo controlado.

Los datos indicativos de la velocidad del material de referencia se obtienen de cada uno de los sensores 80, 81 y 82. Los datos de velocidad obtenidos se comparan después con el perfil de flujo de referencia del fluido y se ajustan para adaptarlos al perfil de flujo de referencia. Los ajustes realizados a los datos de velocidad generados por cada uno de los sensores 80, 81 y 82 pueden implicar, por ejemplo, la aplicación de un factor de escala a los datos de velocidad generados por cada uno de los sensores 80, 81 y 82. El factor de escala requerido para asegurar que los datos generados se ajustan estrechamente al perfil de flujo de referencia se puede designar como factor de profundidad. Los factores de profundidad calculados de esta manera se pueden considerar indicativos del rendimiento real de los sensores 80, 81, 82 y, por lo tanto, se pueden usar en estimaciones posteriores del perfil de velocidad de cualquier material que fluya a través del sensor 41'.

El efecto del proceso de calibración arriba descrito en la precisión de la generación del perfil de velocidad se describe a continuación con más detalle con referencia a la Figura 17.

La Figura 17 ilustra una relación entre la velocidad de un material que fluye dentro del sensor 41' (en el eje "y") y una distancia desde el centro de los sensores 80, 81, 82 (en el eje "x"). Cada una de las Figuras 17(a) y 17(b) representa una pluralidad de puntos de datos de velocidad individuales de un fluido (incluidos los puntos 83a-c, 84a-c, 85a-c de datos de velocidad) que fluye dentro del sensor 41', un perfil 87 u 87' de velocidad ajustado generado sobre la base de los datos de velocidad individuales, y un perfil 86 de distribución de flujo de referencia del fluido, que se puede designar como un perfil real. Cada uno de los puntos 83a-c, 84a-c y 85a-c de datos de velocidad está asociado inicialmente con una profundidad nominal respectiva basada en una profundidad de penetración esperada del sensor.

Las Figuras 17(a) y 17(b) usan el mismo conjunto de datos de velocidad obtenido de los sensores 80, 81 y 82 para un fluido que fluye a través del sensor 41'. El fluido se controla de modo que tenga un perfil de distribución de flujo conocido (es decir, el perfil real 86). En este ejemplo se obtienen nueve mediciones de velocidad de cada uno de los sensores 80, 81 y 82. Se toma un promedio de estas nueve mediciones de velocidad para reducir el ruido de medición, siendo generadas tres mediciones de velocidad media a partir de datos obtenidos de cada uno de los sensores 80, 81 y 82 (es decir, nueve mediciones en total). Los puntos 83-a, 84-a y 85-a de datos de velocidad son datos promediados obtenidos del sensor 82 de campo lejano. Los puntos 83-b, 84-b y 85-b de datos de velocidad son datos promediados obtenidos del sensor 81 de campo medio. Los puntos 83-c, 84-c y 85-c de datos de velocidad son datos promediados obtenidos del sensor 80 de campo cercano. Si bien los datos se recopilan únicamente en un solo lado del sensor 41', cada uno de los nueve puntos de datos de velocidad se refleja en el lado derecho del gráfico de la Figura 17(a) o 17(b), suponiendo una distribución de flujo simétrica dentro del sensor 41'.

La Figura 17(a) usa un único factor de ajuste que, tal como se ha descrito más arriba, asigna los datos de medición a profundidades distribuidas uniformemente dentro de una profundidad que corresponde a aproximadamente un tercio de la longitud de cada conjunto ordenado. Por otro lado, la Figura 17(b) usa factores de profundidad predeterminados obtenidos a partir del proceso de calibración tal como se ha descrito más arriba.

De forma más detallada, la Figura 17(a) ilustra la asignación de los puntos de datos de velocidad a los valores de profundidad esperados utilizando un factor de ajuste nominal, lo que hace que los puntos 83-a, 84-a y 85-a de datos se asignen a profundidades tal como se muestra mediante puntos D1, D2 y D3 de datos de profundidad,

respectivamente. Por otro lado, la Figura 17(b) usa factores de profundidad predeterminados obtenidos a partir de la etapa de calibración tal como se ha descrito más arriba, asignando los mismos puntos 83-a, 84-a y 85-a de datos en su lugar a los puntos D1', D2' y D3' de datos de profundidad, respectivamente. Se realizan asignaciones similares para cada uno de los puntos de datos ilustrados en la Figura 17 (es decir, los puntos 83-b, 84-b, 85-b, 83-c, 84-c y 85-c de datos).

Anteriormente se supuestó que un factor de ajuste utilizado para calcular una profundidad asociada con datos de velocidad obtenidos a partir del conjunto ordenado de electrodos debería dar como resultado una profundidad de medición total correspondiente a alrededor de un tercio de la longitud del conjunto ordenado de electrodos. Además se ha supuesto que los factores de profundidad para los puntos de datos de velocidad correspondientes a diferentes capas (por ejemplo, las capas indicadas por las posiciones uno a nueve en la Figura 10) son los mismos. Tal como se ha descrito más arriba, la Figura 17(a) usa este factor de ajuste único.

Sin embargo, los resultados del proceso de calibración indican que, en general, la profundidad del material a la que penetran los sensores (es decir, qué profundidad corresponde al factor de profundidad apropiado) es menor que el valor supuesto de tres, de modo que la penetración de profundidad máxima es de alrededor un cuarto de la longitud del conjunto ordenado. Además, el factor de profundidad apropiado para los datos de velocidad relacionados con diferentes capas (por ejemplo, capas que ocupan las posiciones uno a nueve en la Figura 10) también varía. En particular, un factor de profundidad apropiado para datos de velocidad relacionados con una capa cercana a la pared del sensor puede ser más pequeño que un factor de profundidad para datos de velocidad relacionados con una capa más alejada de la pared del sensor. En el ejemplo descrito con referencia a la Figura 10, los factores de profundidad apropiados obtenidos del proceso de calibración aumentan desde la capa que ocupa la posición uno hasta la capa que ocupa la posición nueve (donde la capa uno representa una región que está más cerca de la pared del sensor que la representada por la capa nueve). Los factores de profundidad correctos se pueden obtener a través de los procesos de calibración tal como se ha descrito más arriba, con el uso de dichos factores de profundidad que se ilustra en la Figura 17(b).

A modo de ejemplo, un conjunto de factores de profundidad obtenidos mediante el proceso arriba descrito puede ser tal como se describe más abajo. Suponiendo un perfil de profundidad dividido inicialmente en nueve capas iguales (por ejemplo, tal como se muestra en la Figura 10), en la Tabla 1 se muestra un factor de profundidad ejemplar asociado con cada capa.

Tabla 1

Capa n	Factor de profundidad $F_d(n)$	Profundidad asignada $d(n)$ * (mm)	Factor de profundidad anterior $F_d(n)$	Profundidad asignada anterior $d(n)$ * (mm)
1	0,62	6,27	3	1,30
2	1,22	6,38	3	2,59
3	1,77	6,59	3	3,89
4	2,27	6,85	3	5,19
5	2,72	7,14	3	6,48
6	3,12	7,48	3	7,78
7	3,47	7,85	3	9,07
8	3,78	8,23	3	10,37
9	4,03	8,68	3	11,67

Además de los factores de profundidad se muestra una profundidad asignada para cada una de las capas de uno a nueve (suponiendo una longitud de conjunto ordenado de electrodos de 35 mm). A modo de comparación se muestra un factor de profundidad constante de tres, y la profundidad asignada resultante para cada una de las capas de uno a nueve utilizando dicho factor de profundidad (también suponiendo una longitud de conjunto ordenado de electrodos de 35 mm). A partir de los datos mostrados en la Tabla 1 se puede entender que, mientras que anteriormente los valores de profundidad de capa obtenidos se distribuían uniformemente a lo largo de una profundidad correspondiente

a un tercio de la longitud del conjunto ordenado, el uso de factores de profundidad determinados empíricamente permite utilizar una distribución de capa no lineal, con valores de profundidad de capa distribuidos más estrechamente entre aproximadamente un noveno y un quinto de la longitud del conjunto ordenado. Además, se observará que los factores de profundidad mostrados aumentan aproximadamente de forma lineal con el número de capa.

5 La profundidad asignada asociada con cada una de las capas se calcula de acuerdo con la ecuación (3):

$$d(n) = \frac{n}{N} \cdot \frac{L}{F_d(n)} \quad (3),$$

en la que:

d(n) es la profundidad asignada para una capa particular n,

n es el número de capa,

10 N es el número total de capas,

L es la longitud del conjunto ordenado, y

F_d(n) es el factor de profundidad, que varía para cada capa n.

15 Se ha de señalar que el análisis realizado en una serie de geometrías de conjunto ordenado diferentes ha producido factores de profundidad que tienen valores similares asociados con cada una de las nueve capas. Es decir, los valores del factor de profundidad son relativamente insensibles a la longitud del conjunto ordenado y, por lo tanto, proporcionan un factor de escala relativo que se puede aplicar a conjuntos ordenados de diferentes longitudes. Por ejemplo, el mismo factor de profundidad puede ser aplicable a datos de velocidad obtenidos en una primera capa cuando son medidos por cada uno de los sensores de campo cercano, medio y lejano.

20 Por supuesto, se entenderá que el factor de profundidad y los valores de profundidad asignados mostrados en la Tabla 1 se muestran únicamente a modo de ejemplo, y los valores reales pueden variar de acuerdo con cada aplicación. Un factor de profundidad apropiado puede variar en función de factores tales como, por ejemplo, la geometría y alineación del conjunto ordenado, la disposición del conjunto ordenado dentro de una tubería o recipiente, el material que fluye dentro del conjunto ordenado, la temperatura del material, etc.

25 Además, se ha de señalar que la selección del número de capas (nueve en los ejemplos arriba descritos) es arbitraria y se puede modificar según sea necesario. Además, los factores de profundidad apropiados para su uso pueden depender no solo del número de capas seleccionadas, sino también del procesamiento utilizado para generar una imagen de conductividad a partir de datos de medición. De manera similar, un valor de profundidad nominal asociado con un elemento de datos de medición se puede poner a escala mediante un factor constante antes del uso de un factor de profundidad relacionado con la subregión particular dentro del aparato. Sin embargo, en términos generales,
30 el uso de factores de profundidad proporciona una forma de asignar datos de medición a valores de profundidad reales mediante el uso de datos de referencia obtenidos a partir de un proceso de calibración.

35 Los puntos de datos de velocidad asignados mostrados en cada una de las Figuras 17(a) y 17(b) se ajustan para generar un perfil de velocidad. Como se muestra claramente, el perfil ajustado 87' de la Figura 17(b) coincide más con el perfil real 86 que el perfil ajustado 87 de la Figura 17(a). Esto indica la precisión mejorada del proceso de estimación del perfil de velocidad, debido al uso de los factores de profundidad generados por el proceso de calibración arriba descrito.

40 Se apreciará que el proceso de calibración se puede llevar a cabo antes de realizar cualquier estimación del perfil de velocidad, y posteriormente se puede repetir en períodos de tiempo adecuados según se requiera. Es decir, el proceso de calibración (y la generación de factores de profundidad) se puede realizar como parte de un procedimiento de inicialización para un sensor particular. Se entenderá que los factores de profundidad generados están asociados con una geometría de sensor particular y, por lo tanto, dependerán de la disposición de los electrodos (por ejemplo, longitud, anchura, espacio, etc.) y también de la orientación de los electrodos dentro del sensor, y de la disposición del sensor dentro de una tubería u otro entorno operativo. Como tal, puede ser posible realizar un proceso de calibración tras la instalación de un nuevo sensor, y que los factores de profundidad generados se almacenen en una
45 memoria asociada con el controlador 10 para su uso posterior.

Alternativamente, los factores de profundidad se pueden obtener a partir de mediciones realizadas por un aparato de medición alternativo que tiene características similares a las del aparato de medición.

50 Por supuesto, se entenderá que el uso de factores de profundidad se puede emplear en combinación con cualquiera de las realizaciones arriba descritas (por ejemplo, aquellas que solo tienen sensores de campo cercano y de campo lejano) o incluso en sistemas que tienen conjuntos ordenados de electrodos con una separación de electrodos común, o incluso un solo conjunto ordenado de electrodos.

Más generalmente, se entenderá que los factores de profundidad son un ejemplo de datos de referencia que se pueden utilizar para mejorar la precisión de los datos generados en relación con la reología del material alrededor de un sensor. Es decir, los datos indicativos de propiedades del material se generan sobre la base de datos de medición y además sobre la base de datos de referencia (por ejemplo, uno o más factores de profundidad).

5 Tal como se ha descrito más arriba (tanto en el contexto del uso de factores de profundidad como en el procesamiento descrito con referencia a la Figura 14, por ejemplo, en la etapa S14), para ajustar los datos de velocidad generados a una curva de velocidad, que se puede designar como perfil de velocidad de flujo, se usa un algoritmo de ajuste. Un algoritmo de ajuste polinómico es un algoritmo de uso común para dichas operaciones de ajuste. Sin embargo, se ha comprobado que, en algunas circunstancias, un algoritmo de Gauss-Newton puede proporcionar resultados de ajuste
10 más precisos que un algoritmo de ajuste polinómico, en especial en caso de fluidos viscosos. Para mejorar aún más la precisión del ajuste, también se pueden tener en cuenta datos indicativos de las relaciones entre varias propiedades del fluido. Por ejemplo, se pueden usar modelos que describen la relación entre varias propiedades del fluido (por ejemplo, el esfuerzo viscoso y la velocidad de deformación dentro del fluido). Dicho modelo se puede prever como una entrada al algoritmo de ajuste para mejorar aún más el rendimiento de ajuste. Dichos modelos pueden incluir, por
15 ejemplo, un modelo de fluido newtoniano, un modelo de fluido de ley de potencia y un modelo de fluido Herschel-Bulkley. Por supuesto, se entenderá que se pueden usar modelos de fluidos alternativos según sea apropiado para un material particular.

La Figura 18 ilustra una comparación entre la precisión de ajuste proporcionada por un algoritmo de ajuste polinómico tradicional (como se muestra en la Figura 18(a)) y la proporcionada por un algoritmo mejorado de Gauss-Newton con
20 entrada de propiedades de fluido (como se muestra en la Figura 18(b)).

En particular, en la Figura 18 se muestra una relación entre la velocidad (en el eje "y") y una distancia desde el centro de los sensores (en el eje "x"). Cada una de las Figuras 18(a) y 18(b) representa elementos 90 de datos de velocidad individuales de un fluido (que se han asignado a datos de profundidad correspondientes basados en un factor de profundidad), un perfil 89, 89' de velocidad ajustado generado sobre la base de los elementos de datos de velocidad
25 individuales 90 y un perfil 88 de distribución de flujo de referencia del fluido (es decir, un perfil real). Las dos figuras usan el mismo conjunto de datos de velocidad asignados. Como se muestra claramente, el perfil 89 de velocidad ajustado de la Figura 18(a) tiene una parte superior cóncava que se desvía de la parte superior plana del perfil real 88. En cambio, el perfil 89' de velocidad de ajuste con el algoritmo mejorado de Gauss-Newton coincide mejor con el perfil real 88. Es decir, el perfil real 88 comprende una región dentro del centro de la tubería de velocidad relativamente
30 uniforme, disminuyendo la velocidad hacia las paredes de la tubería. Este perfil se estima con precisión usando un algoritmo de Gauss-Newton (Figura 18(b)), pero no se estima con precisión usando un algoritmo de ajuste polinómico (Figura 18(a)).

Por lo tanto, se entenderá que el uso de un algoritmo de Gauss-Newton con propiedades de fluido adicionales puede permitir una coincidencia más estrecha entre los datos generados indicativos de propiedades del material y las
35 propiedades reales del material.

Por supuesto, se entenderá que dicho algoritmo de ajuste se puede usar en combinación con cualquiera de las técnicas descritas en la presente memoria para generar un perfil de velocidad mejorado a partir de datos de velocidad generados.

Además, se entenderá que las diversas técnicas arriba descritas en relación con las mejoras en la precisión de los
40 datos generados indicativos de propiedades del material se pueden usar de forma independiente o en combinación.

Después de obtener un perfil de velocidad ajustado de un fluido (por ejemplo, utilizando cualquiera de las técnicas arriba descritas), la información de la reología (por ejemplo, la viscosidad) relativa al fluido se puede extraer del perfil. Por ejemplo, se puede obtener una velocidad de cizalladura en el fluido diferenciando la velocidad del fluido (con
45 respecto a la distancia desde la superficie del sensor), y se puede obtener un esfuerzo de cizalladura en el fluido en función del diámetro de la tubería 79, y mediciones de presión. Después se puede calcular un valor de viscosidad del fluido basado en el esfuerzo de cizalladura y la velocidad de cizalladura obtenidos.

En caso de un fluido newtoniano, la viscosidad permanece constante y es independiente de la velocidad de cizalladura. Sin embargo, en caso de fluidos no newtonianos (que tienden a encontrarse más comúnmente en procesos industriales), la viscosidad depende de la velocidad de cizalladura. Por lo tanto, para comprender las propiedades reológicas de un fluido, se puede usar un diagrama de reología tal como un perfil de viscosidad como se muestra en
50 la Figura 19. Dicho perfil de viscosidad se puede obtener sobre la base del perfil de velocidad ajustado tal como se ha descrito más arriba. Es decir, se puede obtener una relación entre la viscosidad y la velocidad de cizalladura en función (al menos parcialmente) de datos de velocidad. Dicha relación se puede utilizar posteriormente como punto de referencia en el procesamiento subsiguiente.

El valor de viscosidad y la velocidad de cizalladura del fluido calculados a partir del perfil de velocidad se pueden utilizar, por ejemplo, para determinar si el fluido o el proceso cumplen un criterio predeterminado, que a su vez se puede usar para controlar un proceso industrial. En una de dichas realizaciones se puede requerir un proceso para producir un material que tenga una característica de material predeterminada, tal como, por ejemplo, una fracción de

masa predeterminada. En dicha realización se pueden comparar datos indicativos de propiedades del material (por ejemplo, un valor de viscosidad y una velocidad de cizalladura) con datos de referencia indicativos de una propiedad del fluido (por ejemplo, un perfil de viscosidad de referencia).

5 La Figura 19 ilustra perfiles de viscosidad de fluidos de goma xantana con diferentes fracciones de masa, es decir, un 0,1% en peso, un 0,5% en peso y un 1,0% en peso. Estos perfiles de viscosidad se calculan sobre la base de los perfiles de velocidad de los fluidos de goma xantana medidos por el sensor 41'. En cada uno de los perfiles ilustrados se muestra una relación entre la viscosidad aparente (eje "y") y la velocidad de cizalladura (eje "x").

10 Como fluidos de referencia para imitar fluidos que tienen diferentes viscosidades se pueden utilizar fluidos de goma xantana que tienen diferentes fracciones de masa. En términos generales, un fluido con una fracción de masa más alta es más viscoso que otro fluido con una fracción de masa más baja. Como se muestra en la Figura 19, los perfiles de viscosidad de los fluidos de goma xantana que tienen diferentes fracciones de masa obtenidos a partir de los resultados de medición del sensor 41' se pueden diferenciar claramente entre sí. Los perfiles de viscosidad obtenidos también presentan repetibilidad a través de mediciones individuales. Esto demuestra la capacidad del sensor 41' para proporcionar diferentes perfiles de viscosidad cuando fluyen diferentes líquidos a través del sensor.

15 También se entenderá que el sensor 41' se puede usar como un instrumento de reología, que permite realizar mediciones de reología de fluido durante procesos industriales. En la práctica, las propiedades reológicas de productos comerciales (por ejemplo, champú, acondicionador, etc.) se miden rutinariamente con un reómetro de laboratorio de sobremesa. Sin embargo, esta medición fuera de línea puede llevar mucho tiempo y puede no representar con precisión una propiedad reológica mostrada durante un proceso de fabricación industrial. Al usar el sensor 41' como
20 instrumento de reología se pueden realizar mediciones de reología en línea durante un proceso de fabricación industrial, evitando la necesidad de realizar mediciones fuera de línea independientes.

Además, se entenderá que el sensor 41' se puede utilizar como una herramienta de huellas dactilar para determinar si un fluido ha alcanzado una propiedad predeterminada durante un proceso de fabricación industrial. Para realizar dicho procesamiento se pueden obtener datos de reología de referencia (por ejemplo, un perfil de viscosidad) de un fluido que tiene la propiedad predeterminada. Los datos de reología de referencia se pueden haber medido directamente tal como se describe más arriba usando el sensor 41', por ejemplo, si el fluido que tiene la propiedad predeterminada se ha procesado previamente. Alternativamente, los datos de reología de referencia se pueden obtener de fuentes externas. Durante el proceso de fabricación industrial, se pueden realizar mediciones de reología en un fluido y los resultados obtenidos se pueden comparar con los datos de reología de referencia. Si los resultados de las mediciones de reología en línea están cerca de los datos de reología de referencia, se puede considerar que el fluido tiene la propiedad predeterminada.
25
30

Por ejemplo, si es necesario fabricar una solución de goma xantana que tenga un porcentaje en peso del 0,5%, se entenderá que se puede usar la curva de referencia correspondiente al 0,5% en peso. Durante el uso, los datos de viscosidad (por ejemplo, una parte o la totalidad de un perfil de viscosidad) calculados sobre la base de un perfil de velocidad tal como se ha descrito más arriba se pueden comparar con los perfiles de viscosidad de referencia tal como se muestra en la Figura 19. Si los datos de viscosidad calculados se encuentran cerca del perfil de viscosidad correspondiente a la fracción de masa del 0,5% en peso, esto indica que el fluido analizado está cerca de la fracción de masa deseada.
35

Se entenderá que de este modo se pueden utilizar datos de referencia relacionados con una relación conocida entre propiedades del material (por ejemplo, la viscosidad y la velocidad de cizalladura) para proporcionar información relacionada con una propiedad física del material (por ejemplo, la fracción de masa).
40

El sistema arriba descrito con referencia a las Figuras 1 y 2 dispone de una fuente 8 de corriente y un monitor 9 de tensión. La fuente 8 de corriente es un ejemplo de una fuente de excitación. El monitor 9 de tensión es un ejemplo de un monitor. Sin embargo, se entenderá que cualquier forma adecuada de fuente de excitación se puede usar en combinación con cualquier forma adecuada de monitor. La fuente de excitación puede ser cualquier fuente que sea capaz de generar e inyectar una señal adecuada en el material 2. Por ejemplo, la fuente de excitación puede ser una fuente de tensión, y la corriente suministrada por la misma se controla durante las mediciones.
45

Además, aunque las técnicas arriba descritas generalmente se designan como ERT, el uso de información de la fase de señal (además de la amplitud) también se puede designar como tomografía de impedancia eléctrica (EIT, por sus siglas en inglés). Es decir, las impedancias complejas se consideran en EIT, en lugar de simplemente la resistividad de un material. La impedancia compleja se puede usar para distinguir entre diferentes materiales.
50

También se entenderá que, aunque más arriba se ha descrito la ERT, en algunas realizaciones también se puede utilizar la ECT. Cuando se realizan mediciones de ECT, se pueden aumentar los tamaños de los electrodos para poder observar una capacitancia medible entre los diversos electrodos. El procesamiento requerido para determinar las permitividades de material es generalmente similar al arriba descrito para determinar resistividades o conductividades de material.
55

Mediante las técnicas arriba descritas se puede caracterizar una amplia gama de materiales. Por ejemplo, los materiales caracterizados pueden incluir (pero no se limitan a): pintura, tinta, champús y detergentes, pasta de dientes

5 y cosméticos, alimentos (por ejemplo, helado, yogur, salsas, ketchup), medicamentos tópicos, fluidos industriales (por ejemplo, lodos de perforación, procesamiento de minerales en tanques de flotación) y polímeros. Se entenderá que algunos de los materiales que se caracterizan son acuosos, mientras que otros están basados en aceite. Además, los materiales acuosos por regla general se consideran conductores y, como tales, se puede usar la ERT. Por otro lado, los materiales a base de aceite (por ejemplo, lodos de perforación y polímeros) pueden no considerarse conductores y se pueden caracterizar por ECT.

10 Las excitaciones y mediciones generalmente se describen como aplicadas y realizadas entre pares de electrodos. Sin embargo, se entenderá que se pueden realizar excitaciones y mediciones con referencia a un electrodo de referencia común, o una pluralidad de electrodos. Como tal, se puede aplicar una excitación a un solo electrodo y medir un potencial en un solo electrodo. Además, aunque se describen mediciones secuenciales, se pueden realizar múltiples mediciones en paralelo. Cuando se usa un electrodo de referencia común, es posible utilizar tan solo tres electrodos en un conjunto ordenado de electrodos.

15 Los métodos arriba descritos generalmente realizan mediciones que representan la resistividad del material dentro de una tubería en un solo momento en el tiempo. Sin embargo, para mejorar la precisión de esta medición se pueden realizar varias mediciones y calcular un promedio temporal. El uso de un promedio temporal permite reducir el efecto de fluctuaciones como las causadas por el flujo turbulento. Se puede promediar cualquier número conveniente de muestras según sea necesario.

20 En general se han descrito realizaciones en las que están previstos conjuntos ordenados de electrodos de manera efectiva en serie a lo largo de una tubería (o alrededor de la superficie interior de un recipiente de mezcla), en la dirección del flujo de material esperado. Sin embargo, se apreciará que también son posibles disposiciones alternativas. Por ejemplo, los primeros y segundos conjuntos ordenados se pueden prever efectivamente en paralelo en diferentes posiciones circunferenciales alrededor de la superficie interior de una tubería (o a una altura diferente dentro de un recipiente de mezcla orientado verticalmente).

25 Además, en algunas realizaciones se pueden usar alineaciones alternativas de conjuntos ordenados de electrodos. Por ejemplo, uno o más de los conjuntos ordenados de electrodos pueden estar dispuestos alrededor de una superficie de una tubería o recipiente de mezcla a lo largo de una dirección circunferencial.

Alternativamente, uno o más de los conjuntos ordenados de electrodos pueden estar dispuestos a lo largo de un recorrido helicoidal formado alrededor de una superficie de una tubería o recipiente de mezcla.

30 Además, se entenderá que no es necesario aplicar la misma alineación a cada conjunto ordenado de electrodos. Por ejemplo, un conjunto ordenado de campo cercano (o una pluralidad de conjuntos ordenados de campo cercano) se puede alinear en una primera dirección, mientras que un conjunto ordenado de campo lejano (o una pluralidad de conjuntos ordenados de campo lejano) se puede alinear en una segunda dirección diferente a la primera dirección (por ejemplo, ortogonal a la primera dirección).

35 Si bien más arriba se ha descrito que los conjuntos de mediciones se realizan generalmente en serie, con las mediciones realizadas por un primer conjunto ordenado seguidas de las mediciones realizadas por un segundo conjunto ordenado, se entenderá que esto no es necesario. Además, el orden de las mediciones se puede adaptar fácilmente en función de las necesidades. Cuando se lleva a cabo una correlación cruzada entre mediciones realizadas de pares de primeros y segundos conjuntos ordenados, se debería tener en cuenta el tiempo relativo de las mediciones para asegurar que las velocidades de flujo de material deducidas se calculen con precisión en función de la posición relativa de los conjuntos ordenados. Además, cuando existe poco riesgo de interferencia eléctrica entre las regiones del material de las que se están generando imágenes (por ejemplo, cuando existe un aislamiento efectivo, ya sea mediante el uso de electrodos de tierra o mediante separación espacial), las mediciones se pueden realizar simultáneamente.

45 Se entenderá que, cuando se describe la utilización de técnicas de correlación cruzada para comparar datos obtenidos de diferentes conjuntos ordenados de electrodos, también son posibles otras técnicas de comparación.

Un experto en la materia entenderá que la invención se ha descrito solo a modo de ejemplo, y que la propia invención está definida por las reivindicaciones. Se pueden realizar numerosas modificaciones y variaciones del diseño ejemplar arriba descrito sin apartarse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones. Por ejemplo, la forma precisa y la configuración de los diversos componentes pueden variar.

50 Las realizaciones descritas e ilustradas deben considerarse de carácter ilustrativo y no restrictivo, entendiéndose que solo se han mostrado y descrito las realizaciones preferidas y que se desea que todos los cambios y modificaciones que entren dentro del alcance de las invenciones tal como se define en las reivindicaciones estén protegidos. Se ha de entender que, si bien el uso de palabras como "preferible", "preferiblemente", "preferido" o "más preferido" en la descripción sugiere que una característica así descrita puede ser deseable, no obstante, ésta puede no ser necesaria y realizaciones que carecen de dicha característica pueden considerarse dentro del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas. En relación con las reivindicaciones, se pretende que, cuando se utilicen palabras como "un", "una", "al menos uno" o "al menos una parte" para prologar una característica, no exista la intención de limitar la reivindicación a solo una de esas características a menos que se especifique lo contrario en la

reivindicación. Cuando se utilizan las expresiones "al menos una parte" y/o "una parte", el elemento puede incluir una parte y/o la totalidad del elemento a menos que se indique específicamente lo contrario.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de medición que comprende:

5 una pluralidad de primeros electrodos (4) que comprende un conjunto ordenado (6) lineal de primeros electrodos que se extienden en una dirección (F) de flujo de un material, estando separados cada uno de los primeros electrodos por al menos una primera separación predeterminada (S1);

10 una pluralidad de segundos electrodos (5) que comprende un conjunto ordenado (7) lineal de segundos electrodos que se extienden en la dirección del flujo del material, estando separados cada uno de los segundos electrodos por al menos una segunda separación predeterminada (S2) menor que la primera separación predeterminada, estando el conjunto ordenado (7) lineal de segundos electrodos separado del conjunto ordenado (6) lineal de primeros electrodos;

15 una fuente (8) de excitación dispuesta para excitar al menos uno de dichos primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos primeros electrodos, y para excitar al menos uno de dichos segundos electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos segundos electrodos;

20 un monitor (9) dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos primeros electrodos y para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos segundos electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos segundos electrodos, estando tanto la pluralidad de primeros electrodos como la pluralidad de segundos electrodos conectadas de forma conmutable a la fuente de excitación y al monitor; y

25 un controlador (10) dispuesto para generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una primera región que se extiende una primera distancia desde los primeros electrodos, y para generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una segunda región que se extiende una segunda distancia, menor que la primera distancia, desde los segundos electrodos, sobre la base de dichos parámetros eléctricos monitorizados.

30 **2.** Un aparato de medición según la reivindicación 1, en el que el controlador (10) está dispuesto para generar datos indicativos de una primera distribución de resistividad eléctrica del material dentro de la primera región y una segunda distribución de resistividad eléctrica del material dentro de la segunda región, sobre la base de dichos parámetros eléctricos monitorizados.

3. Un aparato de medición según la reivindicación 1 o 2, en el que la segunda separación predeterminada es menor que la mitad de la primera separación predeterminada.

4. Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la propiedad del material es una velocidad del material.

35 **5.** Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que además comprende una fuente de alteración, en donde la fuente de alteración está dispuesta para introducir una alteración en un flujo de material y el controlador está dispuesto para detectar un efecto de dicha alteración, y en donde opcionalmente:

la fuente de alteración consiste en un calentador.

6. Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que además comprende una segunda pluralidad (20b) de primeros electrodos, estando cada uno separado por al menos la primera separación predeterminada (S1), y opcionalmente:

40 en el que el controlador está dispuesto para generar datos indicativos de una relación entre un parámetro eléctrico monitorizado en al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos y un parámetro eléctrico monitorizado en al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos.

45 **7.** Un aparato de medición según la reivindicación 6, en el que el controlador está configurado para determinar una relación entre el parámetro monitorizado en al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos y el parámetro monitorizado en al menos uno de dicha segunda pluralidad de primeros electrodos, y en el que los datos indicativos de una propiedad del material se basan en la relación determinada.

8. Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, que además comprende:

50 una pluralidad de terceros electrodos, estando separado cada uno de los terceros electrodos por al menos una tercera separación predeterminada;

en donde la tercera separación predeterminada es menor que la primera separación predeterminada y mayor que la segunda separación predeterminada;

5 en donde la fuente de excitación está dispuesta además para excitar al menos uno de dichos terceros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dichos terceros electrodos;

en donde el monitor está dispuesto además para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dichos terceros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos terceros electrodos; y

10 en donde el controlador está dispuesto además para generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una tercera región que se extiende una tercera distancia desde los terceros electrodos sobre la base de los parámetros eléctricos monitorizados, en donde la tercera distancia es menor que la primera distancia y mayor que la segunda distancia.

9. Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que:

15 la fuente de excitación está dispuesta para excitar al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad de primeros electrodos durante un primer período de tiempo, y excitar al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos con el fin de que se establezca un campo eléctrico entre al menos un par de dicha pluralidad de primeros electrodos durante un segundo período de tiempo;

20 el monitor está dispuesto para monitorizar un parámetro eléctrico en al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos durante el primer período de tiempo, y en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dicha pluralidad de primeros electrodos durante el segundo período de tiempo; y

25 el controlador está dispuesto para determinar una relación entre el parámetro monitorizado en al menos uno de la pluralidad de primeros electrodos durante el primer período de tiempo y durante el segundo período de tiempo, y para generar datos indicativos de una propiedad del material dentro de una región que se extiende desde la pluralidad de primeros electrodos sobre la base de dicha relación determinada.

10. Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que:

el controlador está dispuesto para generar datos indicativos de una viscosidad del material;

y/o

el controlador está dispuesto para generar datos indicativos de la reología del material;

30 y/o

el controlador está dispuesto para generar datos indicativos de la reología de fluidos newtonianos y/o fluidos no newtonianos;

y/o

35 el controlador está dispuesto para determinar un perfil de velocidad de flujo del material sobre la base de los datos generados usando un algoritmo de ajuste.

11. Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el controlador está dispuesto para:

40 generar una pluralidad de elementos de datos basados en los parámetros eléctricos monitorizados en al menos uno de dichos primeros electrodos en respuesta a dicha excitación de al menos uno de dichos primeros electrodos, siendo cada elemento de datos indicativo de una propiedad del material dentro de una subregión respectiva dentro de dicho aparato, en donde cada una de la pluralidad de subregiones está asociada con una profundidad nominal predeterminada respectiva que se extiende dentro del aparato de medición desde la pluralidad de primeros electrodos; y

45 generar una pluralidad de elementos de datos de profundidad, estando cada uno de la pluralidad de elementos de datos de profundidad asociado con un elemento respectivo de la pluralidad de elementos de datos indicativo de una propiedad del material;

50 en donde dicha generación de cada uno de dicha pluralidad de elementos de datos de profundidad se basa en una profundidad nominal predeterminada respectiva y un factor de profundidad de una pluralidad respectiva de factores de profundidad, estando asociado cada uno de la pluralidad de factores de profundidad con una subregión respectiva de la pluralidad de subregiones dentro de dicho aparato.

12. Un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende, además:

una tubería (3), en donde, durante el uso, se hace que el material fluya dentro de la tubería;

en donde la pluralidad de primeros electrodos y la pluralidad de segundos electrodos están asociadas con una superficie de la tubería;

5 en donde una anchura de al menos uno de los primeros electrodos y los segundos electrodos en una dirección sustancialmente perpendicular a la dirección del flujo de material dentro de la tubería corresponde al menos al 20% de un perímetro de la tubería.

13. Un aparato de medición según la reivindicación 12, en el que, durante el uso, la pluralidad de electrodos está asociada con una superficie inferior de la tubería.

10 **14.** Un sistema de control industrial que comprende un aparato de medición según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, estando dispuesto el sistema de control industrial para controlar una característica de un proceso industrial sobre la base de dichos datos indicativos de una propiedad del material.

15 **15.** Un sistema de control industrial según la reivindicación 14, estando dispuesto el sistema de control industrial para controlar la característica del proceso industrial sobre la base de una relación entre dichos datos indicativos de una propiedad del material y datos de referencia indicativos de una propiedad de referencia de un material, y opcionalmente:

si dichos datos indicativos de la propiedad del material no tienen una relación predeterminada con dichos datos de referencia, el sistema de control industrial está dispuesto para modificar las características del proceso industrial con el fin de que los datos indicativos de la propiedad del material se acerquen a dichos datos de referencia.

20

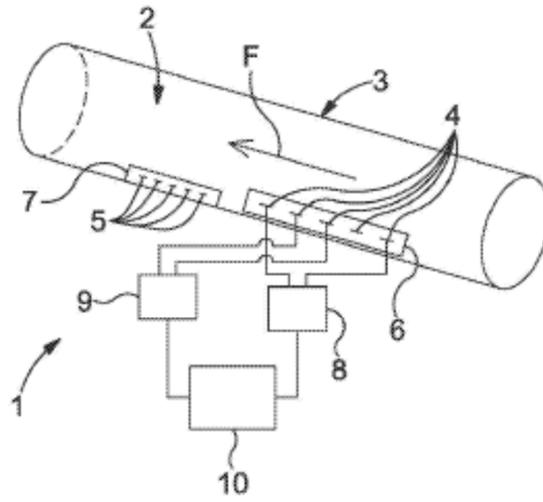


Fig. 1

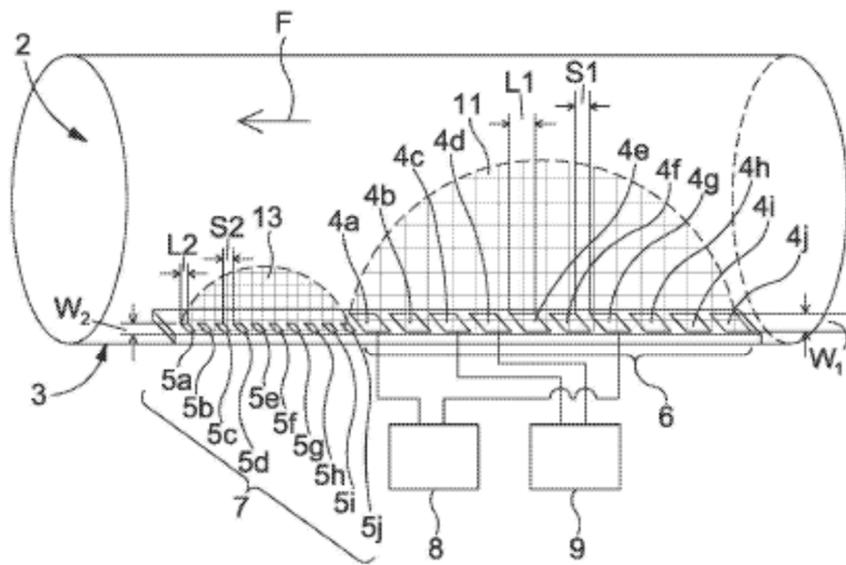


Fig. 2

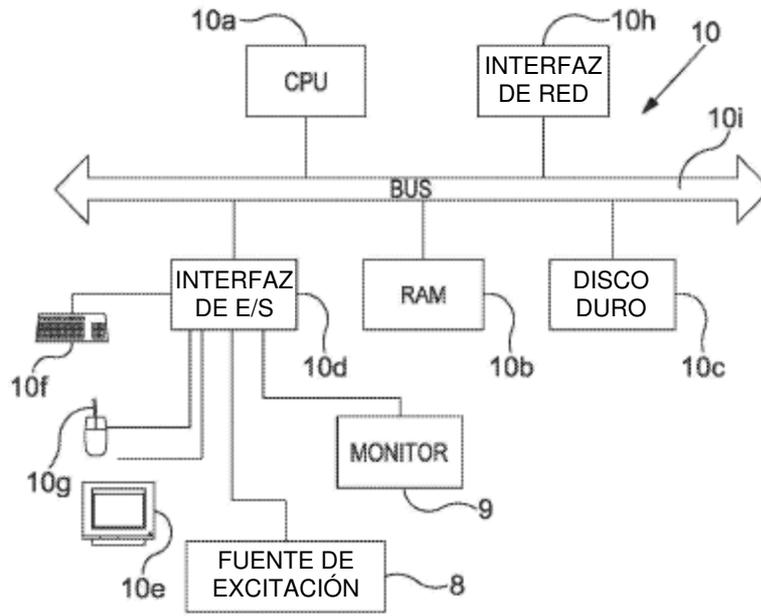


Fig. 3

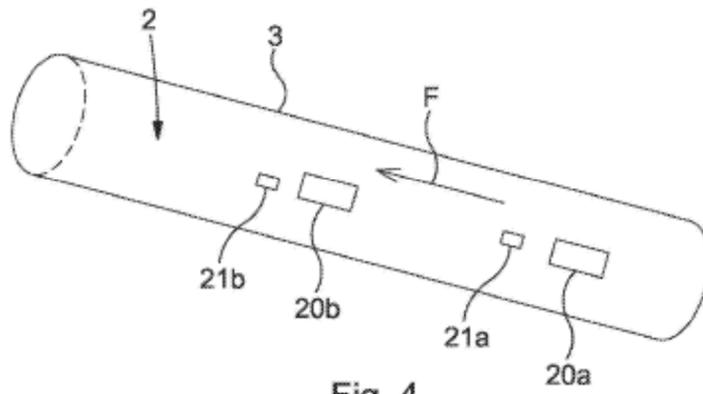


Fig. 4

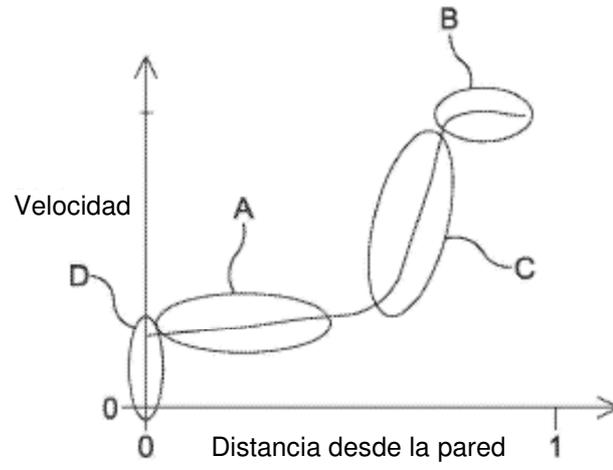


Fig. 5

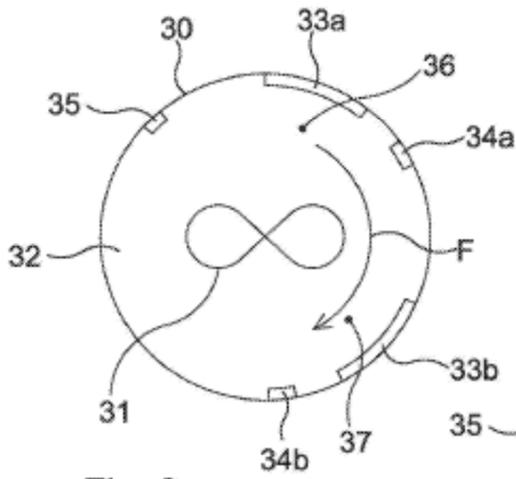


Fig. 6a

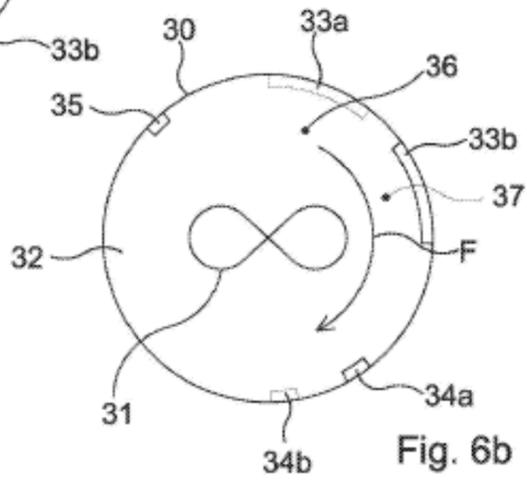


Fig. 6b

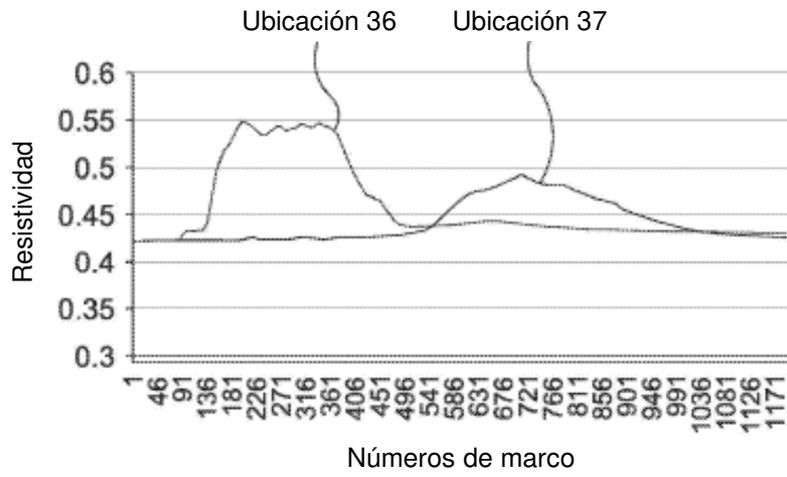


Fig. 7a

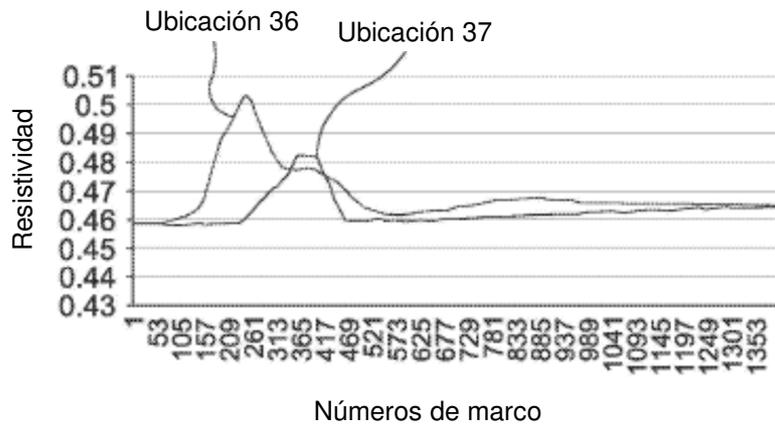


Fig. 7b

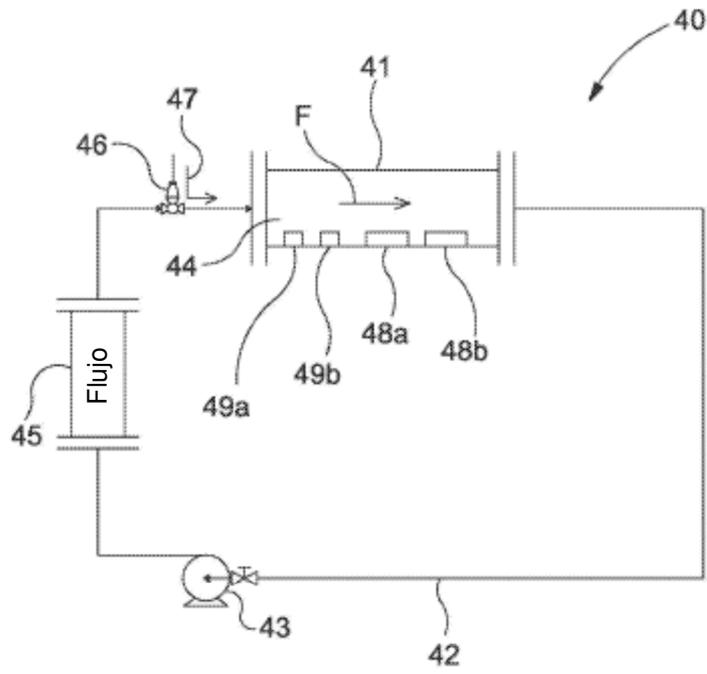


Fig. 8

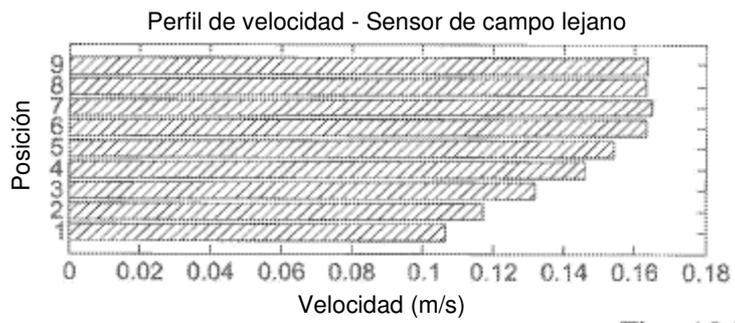
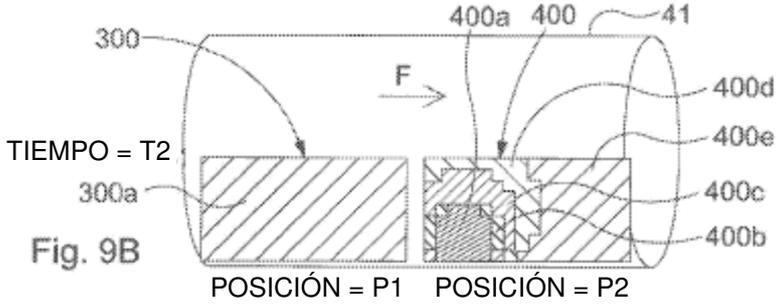
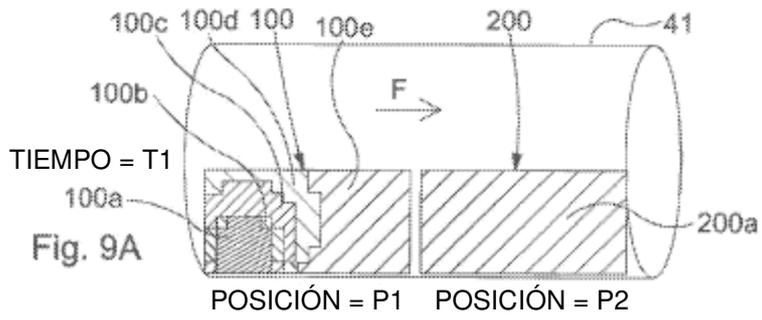


Fig. 10A

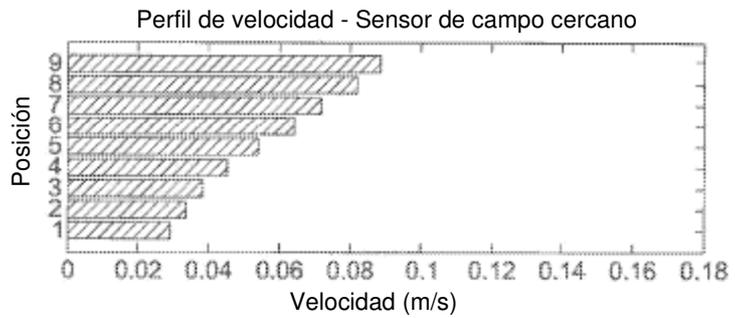


Fig. 10B

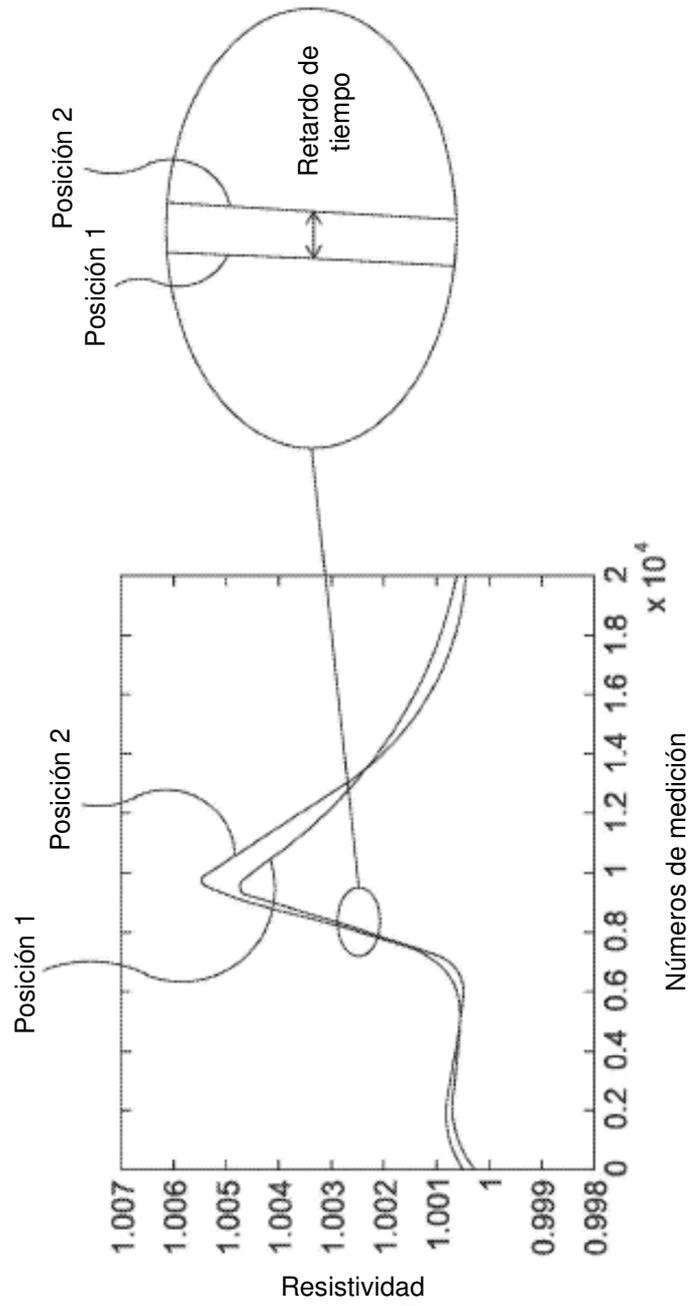


Fig. 11

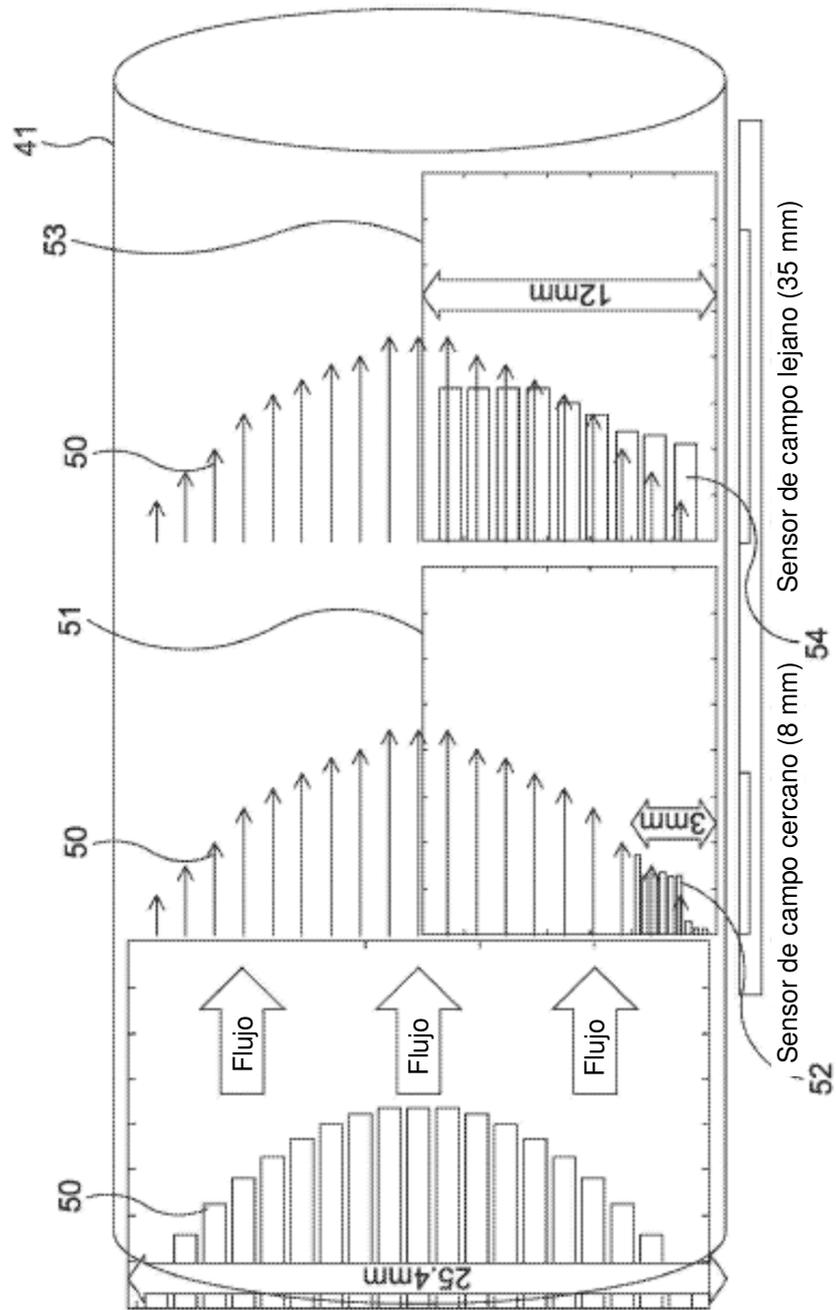


Fig. 12A

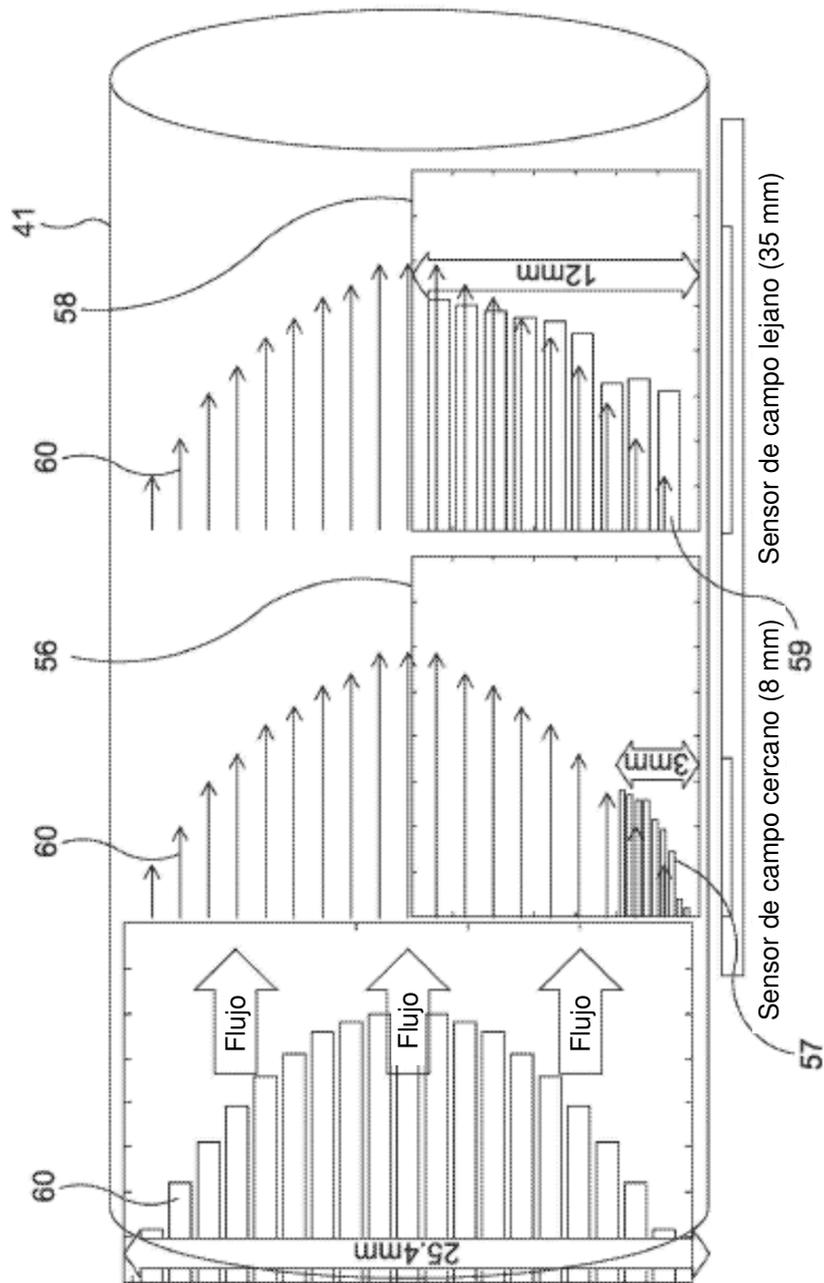


Fig. 12B

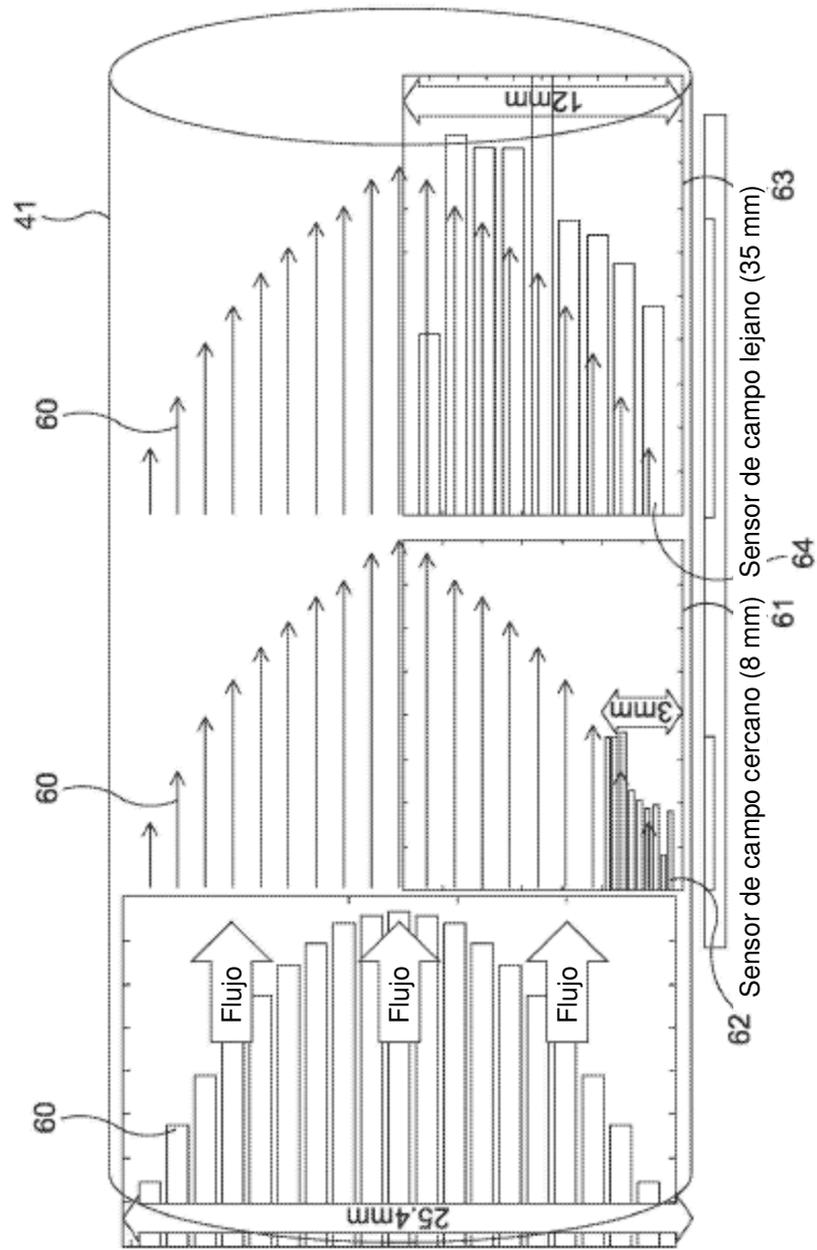


Fig. 12C

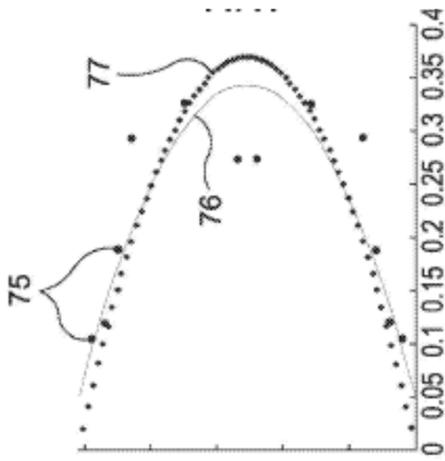


Fig. 13C

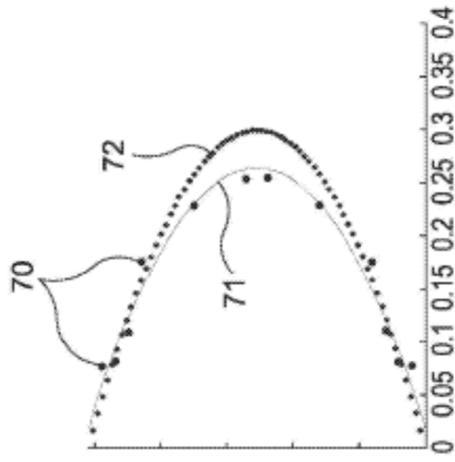


Fig. 13B

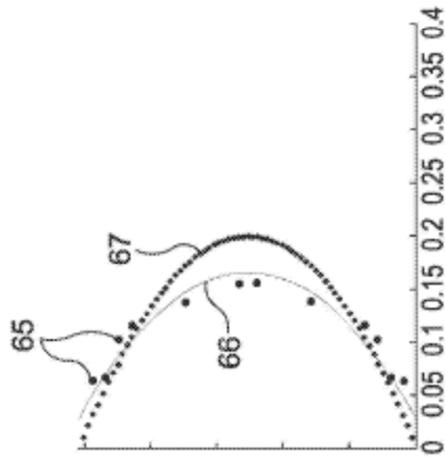


Fig. 13A

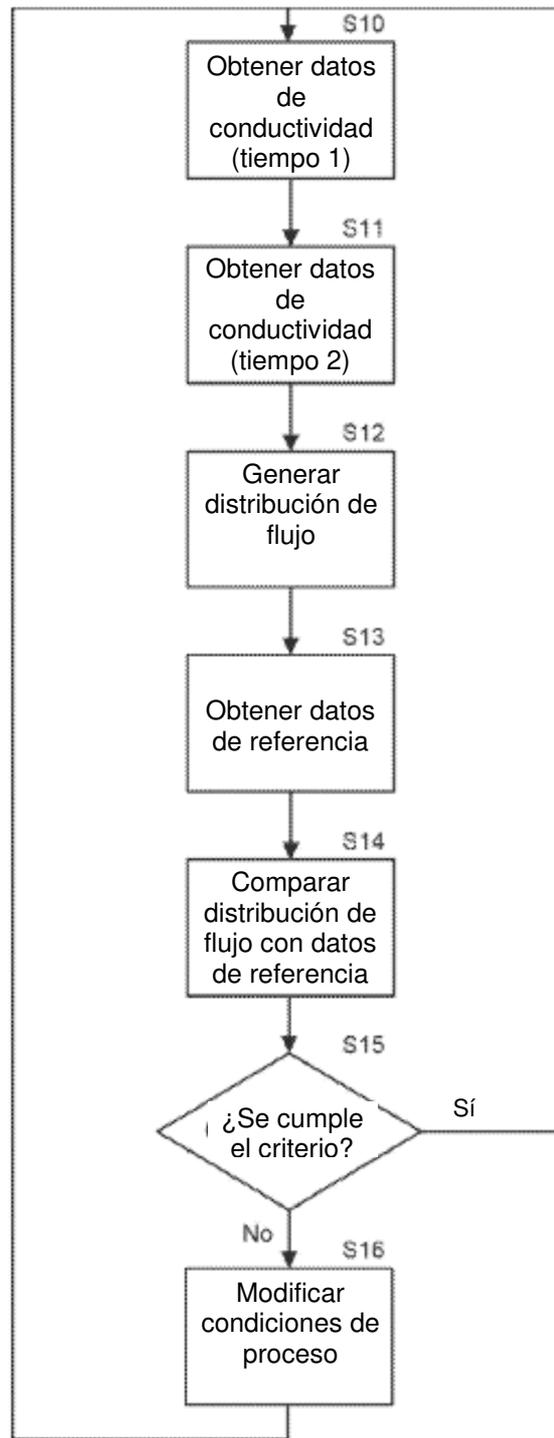


Fig. 14

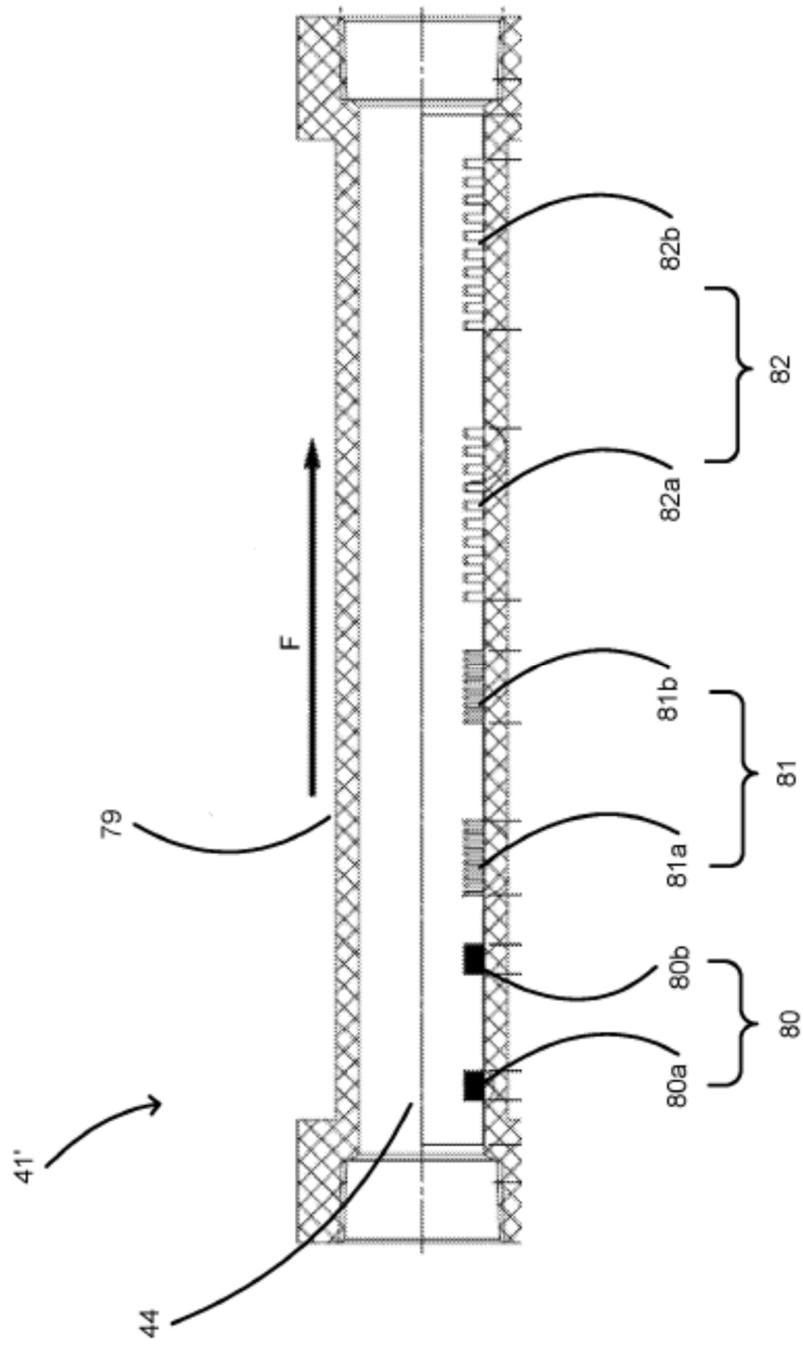
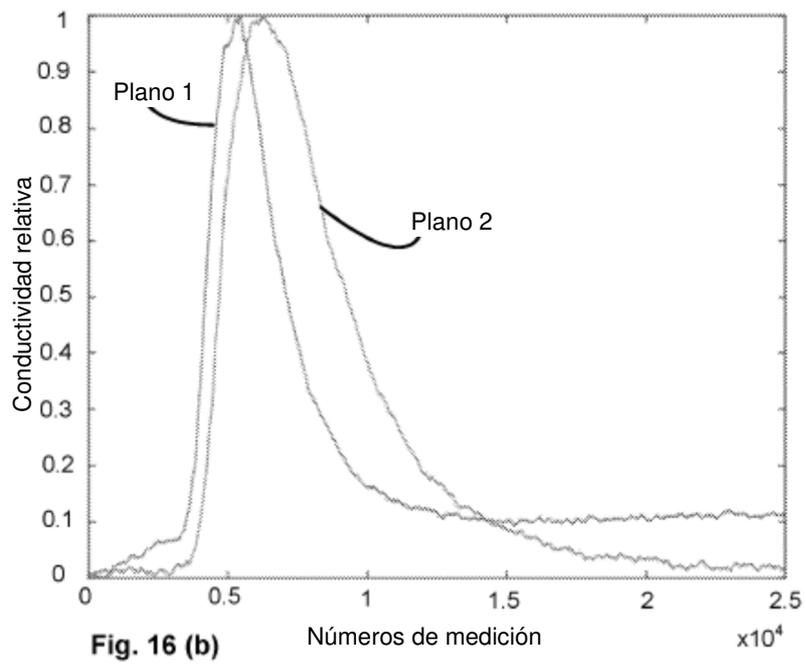
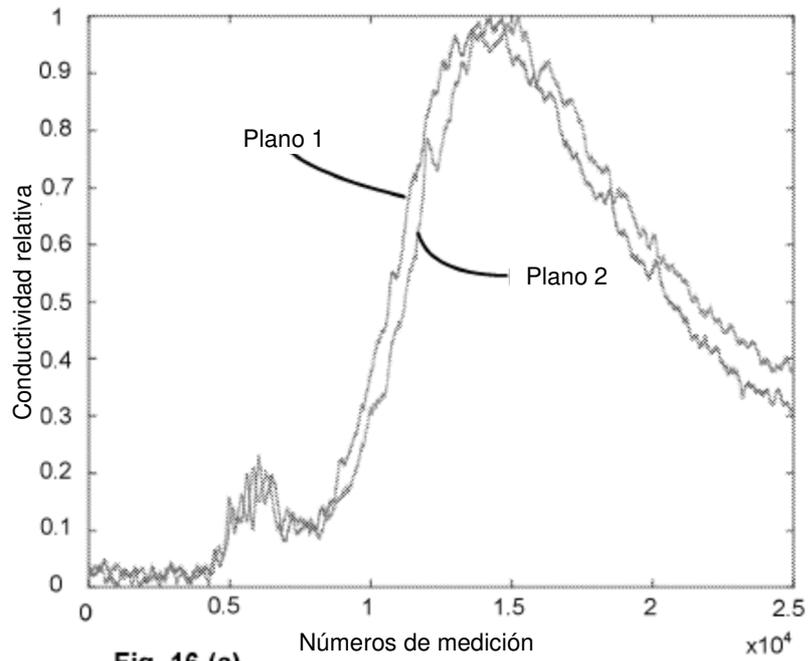


Fig. 15



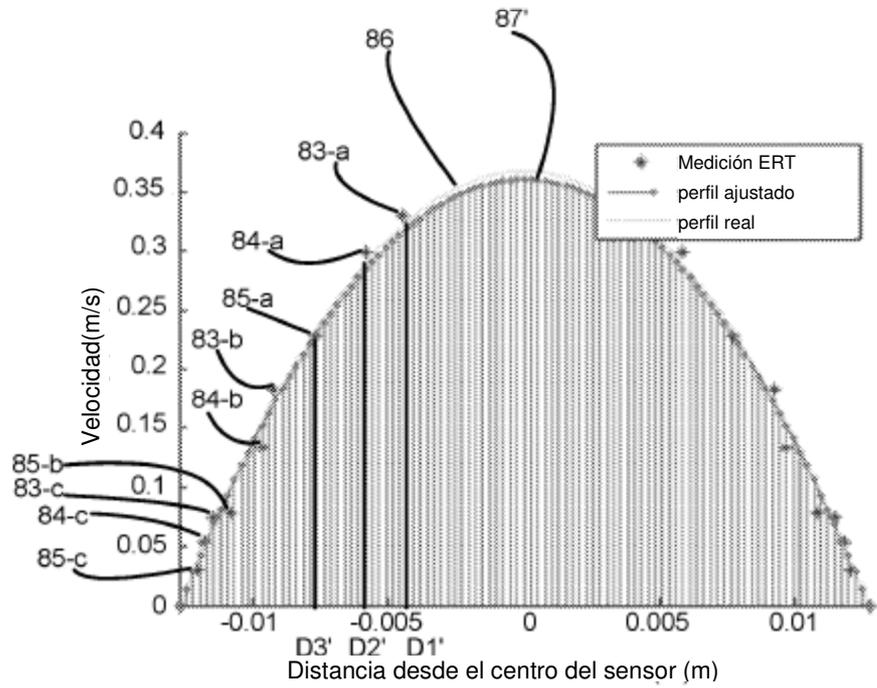
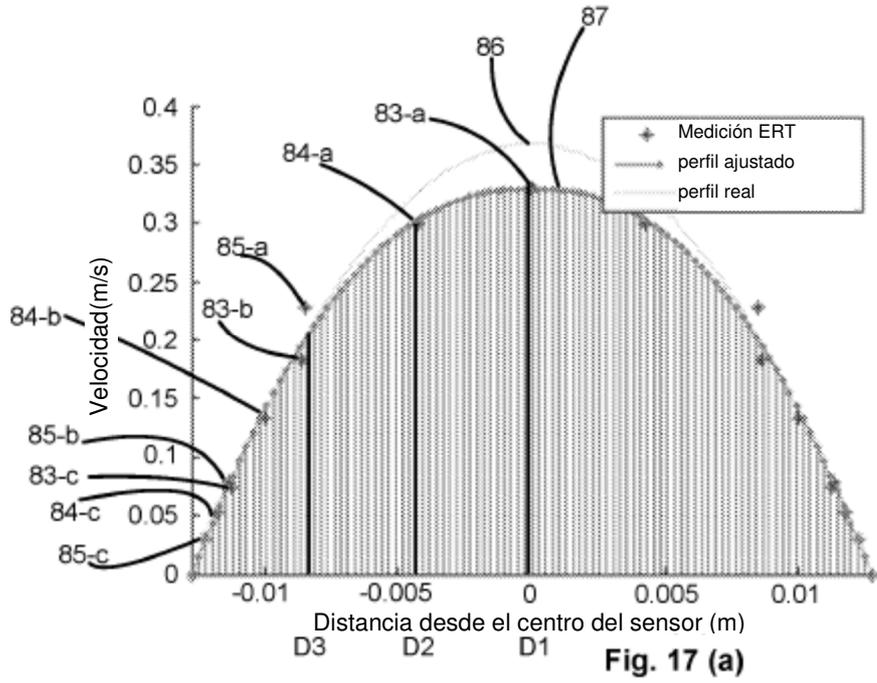


Fig. 17 (b)

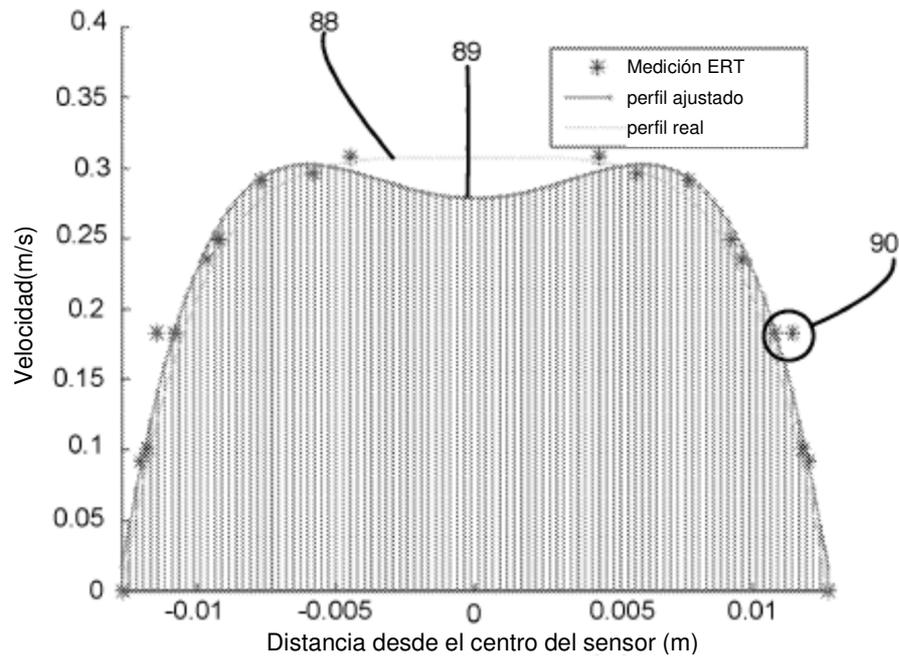


Fig. 18 (a)

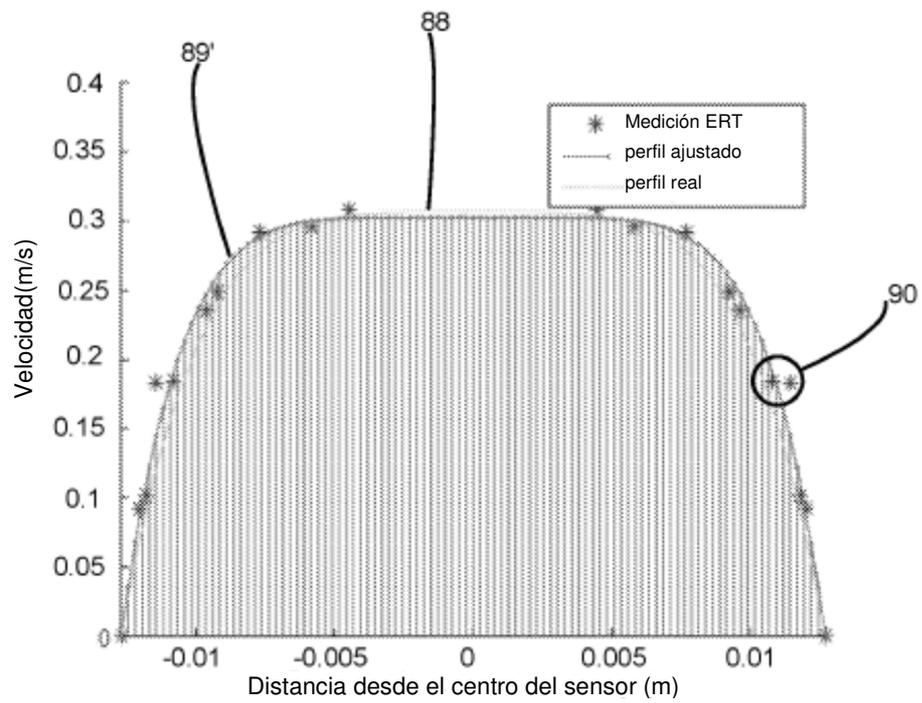


Fig. 18 (b)

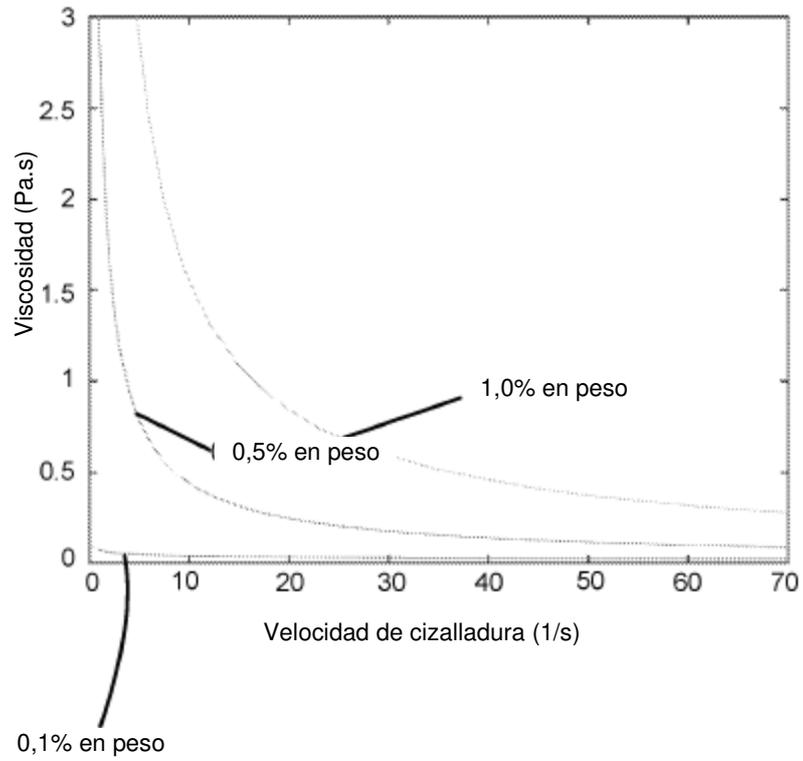


Fig. 19