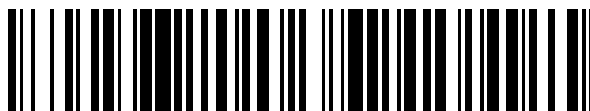


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 556 783**

51 Int. Cl.:

G01F 1/86 (2006.01)

G01N 9/00 (2006.01)

G01N 29/036 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.05.2012 E 12169392 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.09.2015 EP 2667162**

54 Título: **Método y aparato para medir las propiedades físicas de fluidos bifásicos**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.01.2016

73 Titular/es:

AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC. (100.0%)
7201 Hamilton Boulevard
Allentown, PA 18195-1501, US

72 Inventor/es:

DOWNIE, NEIL ALEXANDER y
TREMBLEY, JEAN-PHILIPPE

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 556 783 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y aparato para medir las propiedades físicas de fluidos bifásicos

- 5 La presente invención está relacionada con un método y un aparato para medir las propiedades físicas de fluidos bifásicos. Más concretamente, la presente invención está relacionada con un método y un aparato para medir las propiedades físicas de fluidos bifásicos utilizando un oscilador piezoeléctrico.
- 10 Conocer las propiedades físicas de un fluido – por ejemplo, la densidad o los contenidos máscicos, la tasa de cambio de contenidos de fluido en un depósito de almacenamiento, o el caudal máscico de un fluido a lo largo de un conducto – tiene aplicación comercial significativa. Esta información es valiosa tanto para el comprador como para el suministrador del fluido.
- 15 Para los gases, en muchos casos, es necesario monitorizar los contenidos de un cilindro o recipiente a presión dado para determinar la cantidad de gas que queda en él. Esto es particularmente crítico en situaciones tales como aplicaciones sanitarias.
- 20 Es conocido calcular, de acuerdo con las leyes de los gases, los verdaderos contenidos de un cilindro a partir del conocimiento de la presión del gas en el interior de ese cilindro. La medición de presión es una técnica bien conocida y existen una gran variedad de dispositivos que sirven para medir presión. El tipo más convencional utiliza un diafragma elástico provisto de elementos indicadores de la deformación. Un tipo común de manómetro es un manómetro de Bourdon.
- 25 En el caso de líquidos, el aparato de medida más común es un indicador de nivel de llenado, tal como por ejemplo un nivel de flotador. De forma alternativa, se puede implementar un tipo particular de indicador de nivel por flotador que tenga una densidad precisa y que, por lo tanto, sea capaz de medir de forma aproximada la densidad del líquido.
- 30 Sin embargo, ninguna técnica de medida es apropiada para fluidos bifásicos, es decir, para fluidos que comprenden una parte líquida y una parte gaseosa en los que un menisco separa las dos fases. En otras palabras, fluidos en los que una fracción gaseosa y una fracción líquida coexisten dentro de un volumen concreto de fluido. Los fluidos criogénicos existen habitualmente en dos fases.
- 35 La medición exacta de las propiedades físicas de un fluido bifásico es difícil utilizando técnicas convencionales. Esto se debe a que los ejemplos mencionados anteriormente son apropiados para manejar gas o líquido, pero no para manejar ambos. Además, los fluidos criogénicos presentan problemas de medición adicionales debido a la baja temperatura involucrada.
- 40 Además, para muchas aplicaciones, es deseable conocer el caudal máscico de fluido que sale de un depósito de almacenamiento. Esto puede ser crítico para muchas aplicaciones; por ejemplo, para aplicaciones médicas. Se conocen varios sistemas diferentes de medidor de flujo máscico.
- 45 Una clase de medidores de flujo máscico que se utilizan habitualmente en muchas aplicaciones industriales son los medidores de flujo máscico mecánicos. Estos medidores incluyen componentes mecánicos que se mueven o que giran para medir flujo máscico. Un tipo de estos es el medidor de flujo inercial (o medidor de flujo de Coriolis), el cual mide el flujo de fluido a través del efecto del fluido sobre tubos conformados. Los medidores de flujo de Coriolis pueden manejar un gran rango de caudales con gran precisión. Sin embargo, para detectar el caudal, se necesitan sistemas complejos tales como rasgos de actuación, de detección, electrónicos e informáticos.
- 50 Medidores de flujo máscico de tipo mecánico alternativos son los medidores de diafragma, los medidores rotativos y los medidores de turbina. Sin embargo, por lo general estos tipos de medidores son menos precisos e incluyen partes móviles que pueden verse sometidas a desgaste. Además, medidores tales como los medidores rotativos sólo son útiles para medir caudales relativamente pequeños.
- 55 Una clase alternativa adicional de medidores de flujo máscico son los medidores de flujo electrónicos. Dos tipos principales son los medidores térmicos y los medidores ultrasónicos. Los medidores térmicos de flujo miden la transmisión de calor a través de un tubo calentado para medir caudal. Los medidores ultrasónicos de flujo miden la velocidad del sonido en un medio gaseoso, a veces promediando la velocidad del sonido entre múltiples trayectorias dentro de la tubería. Sin embargo, generalmente ambos tipos de medidor de flujo electrónico requieren un significativo hardware de procesamiento de señal y, por lo general, suelen ser elementos de alto coste.
- 60 Sin embargo, muchos sistemas conocidos son inapropiados para ser usados en sistemas criogénicos. Por lo general, los medidores de flujo para fluidos criogénicos son dispositivos caros y complicados. Además, la precisión de dichos dispositivos depende a menudo de la consistencia de las fracciones de gas y de líquido del fluido. Muchos medidores de flujo son precisos para flujos bifásicos subenfriados y con una pequeña fracción gaseosa (menos del 0,5% de gas en peso), pero son poco precisos para flujos bifásicos con mayor fracción gaseosa, y para fluidos que

son sólo gaseosos. Sin embargo, en aplicaciones criogénicas, las fracciones gaseosa y líquida en el fluido pueden variar enormemente.

5 Por lo general, los sistemas conocidos para medición de flujo criogénico operan midiendo el flujo de forma directa utilizando la velocidad y densidad del fluido, o midiendo el flujo de forma indirecta utilizando propiedades tales como la pérdida de carga y ecuaciones de modelado del fluido. En las Patentes US-A-4.835.456, US-A-3.635.084 y US-A-4.272.982 se describen ejemplos de medidores de flujo que miden el flujo de forma directa. En estos sistemas, el flujo se mide utilizando un elemento rotativo (como por ejemplo una turbina) para derivar de forma directa la velocidad del fluido. Sin embargo, estos sistemas son particularmente vulnerables a variaciones en las fracciones gaseosa y líquida del fluido criogénico y pueden tener poca precisión si los regímenes de flujo sufren cambios o si las proporciones de gas a líquido varían o superan niveles concretos.

15 Las técnicas de medición indirecta incluyen tubos Pitot, medidores de Venturi y medidores de placa perforada. Estos sistemas determinan una pérdida de carga y aplican ecuaciones de modelado del flujo, por ejemplo la ecuación de Bernoulli, a los datos. Para flujo bifásico es necesario un modelado del flujo más complejo y éste depende mucho de las fracciones gaseosa y líquida del fluido criogénico. Un ejemplo se puede encontrar en la Patente US-A-4.168.624.

20 Un grupo alternativo de medidores de flujo dividen el fluido bifásico en sus fases gaseosa y líquida y miden el caudal de cada fase. En las Patentes US-A-4.881.412 y US-A-5.679.905 se describen ejemplos de medidores de flujo de este tipo. Estos medidores son complejos y caros ya que requieren dos o más medidores de flujo para medir el flujo total.

25 En la Patente US-A-7.054.764 se describe un sistema alternativo. Este sistema mide la presión y la temperatura del fluido bifásico, y realiza un cálculo iterativo para determinar el flujo másico.

30 Un tipo alternativo de dispositivo utilizado para medir las propiedades físicas de gases es un dispositivo piezoeléctrico tal como un cristal de cuarzo. Los cristales de cuarzo exhiben un comportamiento piezoeléctrico, es decir, la aplicación de tensión a estos cristales produce una pequeña contracción o una pequeña dilatación del sólido, y viceversa.

35 El documento "A Precise and Robust Quartz Sensor Based On Tuning Fork Technology For (SF₆) – Gas Density Control", Zeisel et al, Sensors and Actuators 80 (2000) 233-236, describe un sistema en el cual se utiliza un sensor de cristal de cuarzo para medir la densidad de gas SF₆ en equipos eléctricos de media y alta tensión a bajas presiones de gas. La medición de la densidad del gas SF₆ es crítica para la seguridad del aparato. Este documento describe una aplicación de baja presión para tecnología de sensor de cuarzo en la cual se utilizan presiones de hasta 8 bar g.

40 La Patente US 4.644.796 describe un método y un aparato para medir la presión de un fluido utilizando un oscilador de cristal de cuarzo alojado dentro de una carcasa de volumen variable que comprende un sistema de fuelles. El volumen interno de la carcasa varía debido a compresión/expansión de los fuelles por la presión del fluido externo. Por consiguiente, la densidad del fluido dentro de la carcasa varía a medida que varía el volumen interno de la carcasa. La densidad en el interior de la carcasa se puede medir utilizando un oscilador de cristal de cuarzo.

45 La Patente WO-A-2006/084263 describe métodos, sensores y sistemas de monitorización de fluidos. Las realizaciones preferentes comprenden dos o más resonadores mecánicos, preferiblemente dos o más resonadores de flexión configurados para detectar, monitorizar o evaluar uno o más fluidos en múltiples posiciones dentro de uno o más sistemas fluidicos.

50 El documento "Flow regime identification in cryogenic gas-liquid flow through vertical tubes", Das et al, Cryogenics, vol. 35 n° 6, Junio de 1995, páginas 393-398, describe un método de identificación de diferentes regímenes de flujo en flujos bifásicos gas-líquido. Se describen fluidos criogénicos y otros fluidos.

55 Los sistemas anteriores describen el uso de un sensor de estado sólido tal como un oscilador de cristal de cuarzo. Sin embargo, ninguno de los sistemas y métodos anteriores es apropiado para medir con precisión las propiedades de un fluido bifásico o de un líquido criogénico.

60 De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método de medida de las propiedades físicas de un fluido bifásico utilizando una pluralidad de osciladores piezoeléctricos inmersos en el flujo de fluido bifásico, comprendiendo el fluido bifásico una fracción gaseosa y una fracción líquida dispersadas dentro de un volumen concreto de fluido, comprendiendo el método: a) medir la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo durante un periodo de medición predeterminado; y b) determinar, a partir de la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico, si el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida y determinar, para cada oscilador piezoeléctrico, la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa y la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción líquida, caracterizado por que, para

caracterizar el fluido bifásico, se determina la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida medidas por cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo.

5 En una realización, el método comprende además comparar la frecuencia de resonancia con una frecuencia umbral predeterminada para determinar si dicho oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida. En una realización, al menos una propiedad física comprende la densidad de al menos el componente líquido del fluido bifásico.

10 En una realización, el método comprende además los pasos de: c) medir el caudal volumétrico del fluido; y d) determinar el caudal másico del fluido bifásico a partir de la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida y a partir de la densidad de la fracción líquida.

15 En una realización, al menos una propiedad física es la frecuencia de detección de una fracción gaseosa y/o el tamaño de una fracción gaseosa. En una realización, la frecuencia de detección de una fracción gaseosa y/o el tamaño de una fracción gaseosa se utilizan para determinar el régimen de flujo de dicho fluido bifásico. En una realización, la frecuencia de detección de una fracción gaseosa y/o el tamaño de una fracción gaseosa se utilizan para determinar si el citado fluido bifásico está hirviendo.

20 De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un conjunto sensor para medir las propiedades físicas de un flujo de fluido bifásico que comprende una fracción gaseosa y una fracción líquida dispersadas dentro de un volumen concreto de fluido, comprendiendo el conjunto sensor un procesador y una pluralidad de osciladores piezoeléctricos para su inmersión en el flujo de fluido bifásico, estando diseñado el procesador para medir la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo durante un periodo de medición predeterminado, para determinar, a partir de la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico, si el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida, y para determinar, para cada oscilador piezoeléctrico, la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa y la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción líquida, caracterizado por que, para caracterizar el fluido bifásico, se determina la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida medidas por cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo.

35 En una realización, dicha pluralidad de osciladores piezoeléctricos están situados alrededor del interior de un conducto a través del cual el citado fluido bifásico es operable para fluir. En una realización, el conjunto sensor es además operable para determinar si el oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida por comparación de la frecuencia de resonancia con una frecuencia umbral predeterminada. En una realización, al menos una propiedad física comprende la densidad de al menos el componente líquido del fluido bifásico.

40 En una realización, el conjunto sensor comprende además un medidor de flujo operable para determinar el caudal volumétrico del fluido bifásico, siendo el medidor de flujo másico operable para determinar el caudal másico del fluido bifásico a partir de la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida y a partir de la densidad de la fracción líquida.

45 En una realización, el fluido bifásico es un fluido criogénico. En una realización, el fluido bifásico está almacenado en un tanque de almacenamiento y se utiliza la densidad del fluido para determinar si se está produciendo estratificación en el tanque de almacenamiento.

50 En una realización, el paso a) comprende: excitar, por medio de un circuito de excitación, al oscilador piezoeléctrico de tal manera que dicho oscilador piezoeléctrico resuene a una frecuencia de resonancia; y medir dicha frecuencia de resonancia durante un periodo de tiempo predeterminado.

En una realización, dicho oscilador piezoeléctrico comprende un oscilador de cristal de cuarzo.

55 En una realización, el cristal de cuarzo comprende al menos un brazo. En una variación, el cristal de cuarzo comprende un par de brazos planos.

En una realización, el cristal de cuarzo es de corte AT o de corte SC.

60 En una variación, la superficie del cristal de cuarzo está expuesta directamente al fluido.

En una realización, el conjunto sensor comprende un circuito de excitación. En una variación, el conjunto sensor comprende un circuito de excitación que comprende un par Darlington colocado en una configuración de realimentación a partir de un amplificador de emisor común.

65

En una realización, el conjunto sensor comprende una fuente de energía. En un sistema, la fuente de energía comprende una batería de ión-litio.

5 En una realización, el conjunto sensor comprende un procesador.

En una variación, el citado oscilador piezoeléctrico comprende un oscilador de cristal de cuarzo.

En una variación, el gas es un gas permanente.

10 En una realización, el recipiente de alta presión es un cilindro de gas.

En una realización, el conjunto sensor comprende un circuito de excitación. En una realización, el conjunto sensor comprende un circuito de excitación que comprende un par Darlington colocado en una configuración de realimentación a partir de un amplificador de emisor común.

15 En una realización, el conjunto sensor comprende una fuente de energía. En una realización, la fuente de energía comprende una batería de ión-litio.

20 En una realización, el conjunto sensor comprende un procesador.

En una realización, el conjunto sensor está diseñado para excitar al oscilador piezoeléctrico de tal manera que el oscilador piezoeléctrico resuene a una frecuencia de resonancia y para medir dicha frecuencia de resonancia durante un periodo de tiempo predeterminado para determinar la densidad del gas.

25 En una realización, el conjunto sensor comprende un circuito de excitación. En una realización, el conjunto sensor comprende una fuente de energía. En una variación, la fuente de energía comprende una batería de ión-litio.

30 De acuerdo con un tercer aspecto de la presente invención, se proporciona un producto de programa informático que puede ser ejecutado por un aparato de procesamiento programable, que comprende una o más porciones de software para realizar los pasos del primer aspecto.

35 De acuerdo con un cuarto aspecto de la presente invención, se proporciona un medio de almacenamiento informático que tiene almacenado en su interior un producto de programa informático de acuerdo con el tercer aspecto.

Se describirán ahora con detalle realizaciones de la presente invención haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

- 40 La Figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema de fluido criogénico;
 La Figura 2 es un diagrama esquemático que muestra un tanque de almacenamiento y un conjunto sensor;
 La Figura 3 es un diagrama esquemático que muestra una sección a través de una tubería vertical y de un conjunto sensor de acuerdo con una primera realización de la invención;
 La Figura 4 es una sección transversal de la tubería y del conjunto sensor de la Figura 3;
 45 La Figura 5 es un diagrama esquemático que muestra una sección a través de una tubería horizontal y de un conjunto sensor de acuerdo con una segunda realización de la invención;
 La Figura 6 es una sección transversal de la tubería y del conjunto sensor de la Figura 5;
 Las Figuras 7a) a 7e) muestran diferentes regímenes de flujo en una tubería vertical;
 Las Figuras 8a) a 8f) muestran diferentes regímenes de flujo en una tubería horizontal;
 La Figura 9 es un diagrama esquemático de un circuito de excitación para ser usado con las realizaciones primera o segunda;
 50 La Figura 10 es un diagrama esquemático que muestra un circuito de excitación alternativo para ser usado con las realizaciones primera o segunda;
 La Figura 11 es un diagrama esquemático que muestra un circuito de excitación alternativo para ser usado con las realizaciones primera o segunda;
 55 La Figura 12 muestra una gráfica de frecuencia del cristal de cuarzo (kHz) sobre el eje Y en función de la densidad (kg/m^3) para varios gases diferentes;
 La Figura 13 muestra una gráfica de masa de gas (en kg) sobre el eje Y en función de la presión (bar g) sobre el eje X para Argón, Oxígeno y para una mezcla Argón:Dióxido de Carbono;
 La Figura 14 muestra una gráfica de masa de gas (en kg) sobre el eje Y en función de la densidad (kg/m^3)
 60 sobre el eje X para los mismos tres gases (Argón, Oxígeno y una mezcla Argón:Dióxido de Carbono) mostrados en la Figura 13;
 La Figura 15 muestra una gráfica de frecuencia (en kHz) sobre el eje Y en función del tiempo (en milisegundos) sobre el eje X para Nitrógeno líquido que está hirviendo vigorosamente;
 La Figura 16 muestra una gráfica de frecuencia (en kHz) sobre el eje Y en función del tiempo (en milisegundos) sobre el eje X para Nitrógeno líquido que fluye lentamente;

La Figura 17 muestra una gráfica de frecuencia (en kHz) sobre el eje Y en función del tiempo (en milisegundos) sobre el eje X para Nitrógeno líquido que fluye con mayor rapidez;

La Figura 18 muestra una gráfica de frecuencia (en kHz) sobre el eje Y en función del tiempo (en segundos) sobre el eje X para Nitrógeno líquido que está fluyendo según un flujo tapón ("slug flow");

La Figura 19 es un diagrama de flujo que ilustra un método de acuerdo con una realización descrita;

La Figura 20 es un diagrama de flujo que ilustra un método de acuerdo con una realización descrita;

La Figura 21 muestra una gráfica del comportamiento en frecuencia de diferentes tipos de cristales;

La Figura 22 es un diagrama esquemático que muestra un conjunto sensor alternativo que comprende dos cristales de cuarzo; y

La Figura 23 muestra un sistema alternativo que utiliza una unidad de datos electrónica remota.

La Figura 1 muestra una vista esquemática de un sistema 10 de fluido criogénico de acuerdo con un ejemplo no en conformidad con la invención.

El sistema 10 de fluido criogénico comprende un tanque 100 de almacenamiento que tiene un cuerpo 102 del tanque. El cuerpo 102 del tanque comprende un contenedor generalmente cilíndrico que tiene una base 102a plana diseñada para permitir que el tanque 100 de almacenamiento se sostenga de pie sin ayudas sobre una superficie plana. Sin embargo, se debe apreciar que el tanque 100 de almacenamiento puede adoptar otras formas apropiadas; por ejemplo cualquier depósito de almacenamiento criogénico apropiado tal como un depósito portátil, un camión cisterna, un remolque, una instalación de producción química, una planta de separación de aire-líquido o combinaciones de los mismos.

Cualquier fluido apropiado puede estar contenido dentro del sistema 10 de fluido criogénico. Sin embargo, una lista no exhaustiva de fluidos apropiados puede comprender: Nitrógeno líquido; Argón líquido; Hidrógeno líquido; Helio líquido; Oxígeno líquido o mezclas de los mismos.

En esta realización, el cuerpo 102 del tanque tiene una estructura conformada de acero, de aluminio y/o de materiales compuestos. En el interior de las paredes se proporciona aislamiento por vacío para aislar los contenidos a baja temperatura del entorno exterior. Sin embargo, se pueden utilizar otros tipos de aislamiento apropiados.

El tanque 100 de almacenamiento contiene un volumen de fluido criogénico. El fluido criogénico comprende un volumen de líquido criogénico que tiene un nivel L de fluido. Por encima del nivel L de fluido existe un volumen de gas o vapor. En el interior del tanque se proporciona un primer conjunto 200 sensor para medir las propiedades físicas del fluido criogénico dentro del tanque 100 de almacenamiento. El primer conjunto 200 sensor se describirá más adelante haciendo referencia a la Figura 2.

El tanque 100 de almacenamiento comprende tres tuberías 104, 108, 112 de alimentación. La tubería 104 es una tubería de alimentación de líquido y sale del cuerpo 102 del tanque de almacenamiento en un punto contiguo a la base 102a. La tubería 104 es substancialmente horizontal y es operable para aspirar fluido criogénico del tanque 100 de almacenamiento o para suministrar fluido criogénico a dicho tanque y comprende una válvula 106. La válvula 106 puede ser operable manualmente como se muestra y comprender un cuerpo de la válvula que se puede ajustar axialmente acercándolo a un asiento de válvula o alejándolo de él de manera selectiva, por medio de un giro de un mango agarrable, para abrir o cerrar la válvula 106. De forma alternativa, la válvula 106 puede estar controlada de manera automática, por ejemplo, por una válvula de solenoide.

La tubería 108 es también una tubería de alimentación de líquido y sale del cuerpo 102 del tanque de almacenamiento en un extremo superior del mismo. Sin embargo, la tubería 108 se extiende una distancia tal hacia el interior del cuerpo 102 del tanque que el extremo de la tubería 108 queda situado por debajo del nivel L del líquido en el tanque 100 de almacenamiento. La tubería 108 es operable para aspirar (por medio de una bomba o bajo la presión del gas superior) del tanque 100 de almacenamiento o para suministrar fluido criogénico a dicho tanque y comprende una válvula 110. La válvula 110 puede ser operable manualmente (como se muestra) o puede estar controlada de manera automática, por ejemplo, por una válvula de solenoide. Al menos una porción de la tubería 108 está situada en una configuración vertical.

Las tuberías 104, 108 comprenden tuberías aisladas e incluyen encamisamiento de vacío u otro revestimiento aislante para permitir que se transporten líquidos criogénicos al/desde el depósito 100 de almacenamiento.

Un segundo conjunto 300 sensor está situado a lo largo de una sección vertical de la tubería 108. El segundo conjunto 300 sensor se describirá haciendo referencia a las Figuras 3 y 4. Además, dentro de la tubería 108 está situado un medidor 350 de flujo volumétrico para medir el caudal del fluido como se describirá más adelante. El medidor 350 de flujo puede comprender cualquier sistema apropiado; por ejemplo una turbina, para medir el caudal de fluido.

Un tercer conjunto 400 sensor está situado a lo largo de una sección substancialmente horizontal de la tubería 104. El tercer conjunto 400 sensor se describirá haciendo referencia a las Figuras 4 y 5. Además, dentro de la tubería 104 está situado un medidor 450 de flujo volumétrico para medir el caudal del fluido en el interior de dicha tubería como

se describirá más adelante. El medidor 450 de flujo puede comprender cualquier sistema apropiado; por ejemplo una turbina, para medir el caudal de fluido.

5 La tubería 112 es una tubería de alimentación de gas y está situada en un extremo superior del tanque 100 de almacenamiento. El extremo de la tubería 112 está situado por encima del nivel L de líquido en el tanque 100 de almacenamiento y está diseñado para permitir el purgado de gas o vapores situados por encima del líquido criogénico que pueden conducir a una presión excesiva dentro del tanque 100 de almacenamiento. A este respecto, la tubería 112 comprende una válvula 114 para permitir la extracción selectiva de gas del tanque 100 de almacenamiento.

10 El sistema 10 de fluido criogénico está provisto de un primer conjunto 200 sensor. El primer conjunto 200 sensor se describirá haciendo referencia a la Figura 2. La Figura 2 muestra una vista más detallada del interior del tanque 100 de almacenamiento.

15 El tanque 100 de almacenamiento tiene un volumen interno V y una altura interna vertical H (Figura 2). Durante su utilización, una proporción del volumen interno V está llena de líquido criogénico que tiene un nivel L de líquido. El primer conjunto 200 sensor es operable para medir, entre otras propiedades, el nivel L de líquido.

20 El conjunto 200 sensor está diseñado para medir la densidad del fluido en puntos concretos de la altura H interna del tanque 100 de almacenamiento. El conjunto 200 sensor comprende una pluralidad de osciladores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo colocados formando una pila vertical. Cada oscilador 202 de cristal de cuarzo está conectado a un respectivo circuito 204 de excitación por cableado apropiado. En la Figura 2 sólo se muestra un único circuito 204 de excitación. Sin embargo, se debe entender que se proporciona un circuito 204 de excitación para cada oscilador 202 de cristal de cuarzo. También se puede proporcionar un procesador 206, ya sea por separado o como parte del
25 circuito 204 de excitación. El conjunto 200 sensor puede estar alimentado por una fuente de batería o por una fuente de energía externa (por ejemplo, una conexión a una red de energía eléctrica). Estos detalles se describirán más adelante.

30 En el ejemplo no de acuerdo con la invención mostrado en la Figura 2, los osciladores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo están dispuestos sobre una estructura 208 de soporte vertical situada dentro del volumen V interno del tanque 100 de almacenamiento. En la Figura 2, se muestran catorce osciladores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo (es decir, N=14). Sin embargo, se podría usar cualquier otro número apropiado de osciladores que fuera necesario.

35 Cada oscilador 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo está diseñado para actuar, en un aspecto, como un sensor de nivel, y es operable para detectar la densidad dentro del volumen V interior del tanque 100 de almacenamiento a una altura concreta del tanque 100 de almacenamiento. Los sensores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo están equiespaciados a lo largo de la estructura 208 de soporte en la dirección de la altura H vertical interior del tanque 100 de almacenamiento.

40 Cada oscilador 202 de cristal de cuarzo comprende una sección pequeña, delgada, de cuarzo cortado. El cuarzo exhibe comportamiento piezoeléctrico, es decir, la aplicación de una tensión a través del cristal provoca que el cristal cambie de forma, generando una fuerza mecánica. De manera inversa, una fuerza mecánica aplicada al cristal produce una carga eléctrica.

45 Dos superficies paralelas del oscilador 202 de cristal de cuarzo están metalizadas con el fin de proporcionar conexiones eléctricas a través del volumen del cristal. Cuando se aplica una tensión a través del cristal por medio de los contactos metálicos, el cristal cambia de forma. Aplicando una tensión alterna al cristal, se puede hacer que el cristal oscile.

50 El tamaño y el espesor físicos del cristal de cuarzo determinan la frecuencia característica o de resonancia del cristal de cuarzo. Es más, la frecuencia característica o de resonancia del cristal 202 es inversamente proporcional al espesor físico entre las dos superficies metalizadas. Los osciladores de cristal de cuarzo son bien conocidos en la técnica y por esta razón no se describirá aquí con mayor detalle la estructura del oscilador 202 de cristal de cuarzo.

55 La frecuencia de vibración de resonancia de un cristal de cuarzo variará dependiendo del ambiente en el cual esté situado el cristal. En un vacío, el cristal tendrá una frecuencia concreta. Sin embargo, esta frecuencia cambiará en diferentes ambientes. Por ejemplo, en un gas, la vibración del cristal será amortiguada por las moléculas circundantes del fluido y esto afectará a la frecuencia de resonancia y a la energía necesaria para hacer que el cristal oscile a una amplitud dada. En un líquido apropiado, la vibración será aún más amortiguada y la frecuencia de
60 oscilación sufrirá un cambio aún mayor.

Además, la adsorción de gas o la deposición de materiales circundantes sobre el cristal afectará a la masa del cristal que vibra, alterando la frecuencia de resonancia. Esto forma la base para los analizadores de gases selectivos de uso común, en los cuales se forma sobre el cristal una capa absorbente y la masa de dicha capa aumenta a medida que se va absorbiendo gas sobre la capa absorbente. Sin embargo, en el presente caso, no se aplica ningún recubrimiento al oscilador 202 de cristal de cuarzo. Es más, la adsorción o deposición de material sobre el oscilador

202 de cristal de cuarzo es indeseable en el presente caso, dado que se puede ver afectada la precisión de la medida.

5 Por lo tanto, generalmente se considera que los osciladores de cristal de cuarzo son inapropiados para ser usados en líquidos debido a la deposición de contaminantes y de fluido sobre los brazos del oscilador de cristal. Sin embargo, los inventores han descubierto que, sorprendentemente, en el caso de líquidos criogénicos un oscilador de cristal de cuarzo proporciona una medida precisa de densidad sin ninguna contaminación del cristal, la cual conduciría a errores e imprecisiones.

10 El oscilador 202 de cristal de cuarzo de la presente realización tiene forma de diapasón y comprende un par de brazos 202a (Figura 9) de aproximadamente 5 mm de longitud diseñados para oscilar a una frecuencia de resonancia de 32,768 kHz. Los brazos 202a del diapasón oscilan normalmente en su modo fundamental, en el cual se mueven de forma sincronizada acercándose y alejándose el uno con respecto al otro a la frecuencia de resonancia.

15 Además, es deseable utilizar cuarzo de corte AT o de corte SC. En otras palabras, una sección plana de cuarzo se corta a ángulos seleccionados concretos de tal manera que el coeficiente de variación con la temperatura de la frecuencia de oscilación se puede ajustar para que sea parabólico con un pico ancho a la temperatura de funcionamiento deseada. Por lo tanto, el oscilador de cristal se puede diseñar de tal manera que la pendiente en la parte superior del pico sea exactamente cero en las condiciones de funcionamiento que se le piden.

20 Cristales de este tipo están disponibles habitualmente a coste relativamente bajo. En contraste con la mayoría de osciladores de cristal de cuarzo que se utilizan *in vacuo*, en la presente realización el oscilador 202 de cristal de cuarzo está expuesto al gas y al líquido presentes en el volumen V interno del tanque 100 de almacenamiento.

25 Dado que los osciladores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo tienen una frecuencia de resonancia que depende de la densidad del fluido circundante, el conjunto 200 sensor es operable para detectar cuáles de los osciladores 202-1 – 202-N están inmersos en el líquido criogénico y cuáles no lo están. Esto permite la identificación del nivel L de líquido en el tanque 100 de almacenamiento.

30 Por lo tanto, en un nivel simple, la pluralidad de osciladores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo son operables para proporcionar una indicación precisa del nivel L de líquido en el tanque 100 de almacenamiento debido a la diferencia de densidad medida entre el líquido criogénico y el gas o vapor en el tanque 100 de almacenamiento.

35 Además, la provisión del conjunto 200 sensor permite monitorizar parámetros más avanzados en el interior del tanque 100 de almacenamiento.

40 Un problema que puede aparecer en el interior de los tanques de almacenamiento tales como el tanque 100 de almacenamiento es que la circulación por convección del líquido puede conducir a una estratificación por densidad en líquidos de un único componente. En ausencia de mezclado mecánico continuo del líquido de un único componente (por ejemplo, el líquido criogénico), mecanismos intrínsecos de flujo de capa límite de pared sobrecalentado, evaporación incompleta en la superficie, y un chorro descendente central de líquido con menor grado de sobrecalentamiento, pueden conducir a estratificación en dos capas.

45 Cada capa estratificada estará a una temperatura más o menos uniforme pero a una temperatura diferente a la de la otra capa. Por ejemplo, una capa más caliente, menos densa, puede estar situada por debajo de una capa más fría, más densa.

50 La diferencia de temperatura a través de la interfaz líquido-líquido entre las dos capas es pequeña, típicamente del orden de 0,1 a 1,0 K. Por lo tanto, el efecto de mezclado por difusión molecular excitada térmicamente en ausencia de cualquier movimiento de convección es relativamente pequeño. Por consiguiente, la diferencia de densidad asociada a través de la interfaz líquido-líquido actúa para suprimir el mezclado por convección local y la estratificación es, por lo tanto, extremadamente estable.

55 Sin embargo, si este estado se mantiene, el calentamiento de la capa superior por el flujo de capa límite de pared continuará. Esto conducirá a un aumento continuado de temperatura, a un aumento de espesor acompañado por una migración hacia abajo de la interfaz o a una combinación de los dos efectos.

60 Cuando la diferencia de densidad entre las dos capas se hace suficientemente grande, el flujo de capa límite de pared sobrecalentado en la capa inferior, más densa, de repente tiene flotabilidad e inercia suficientes para penetrar en la interfaz líquido-líquido. El flujo de capa límite queda atrapado en la capa inferior y no se puede producir nada de evaporación para liberar la energía térmica contenida en él. En vez de esto, la capa límite de pared da la vuelta en la interfaz, y la energía cinética y energía térmica contenidas en ella quedan bloqueadas dentro de la capa inferior de líquido. Esto provoca que, en lugar de lo anterior, la capa inferior de líquido se caliente.

65

5 Cuando esto sucede, la velocidad de evaporación disminuirá como la primera indicación de un efecto de estratificación y aumento asociado en el desbordamiento térmico a través del estado sobrecalentado inestable. Este tipo de desbordamiento térmico en un líquido de un único componente será liberado mediante una ebullición con nucleación violenta de la capa inferior, con consecuencias tales como la eyección de vapor mezclado con líquido a través de los orificios de purgado y posibles daños mecánicos al depósito de almacenamiento.

10 Con un líquido criogénico multicomponente, la iniciación y el crecimiento de la estratificación se pueden producir de varias maneras, dependiendo de la identidad de los componentes del líquido, y de la historia previa de los elementos líquidos. Una vez más, la estratificación es convectivamente estable; pero ahora el mezclado a través de la interfaz líquido-líquido está controlado por doble difusión, contribuyendo los gradientes de temperatura y de concentración a un mezclado por convección del líquido, impulsado por un gradiente de densidad.

15 Esta estratificación en una mezcla de líquido criogénico conduce inevitablemente a evaporación inestable, la cual ha adquirido el nombre de "inversión de capas" (*"rollover"*). La evaporación inestable se produce cuando las capas estratificadas se mezclan espontáneamente, lo cual puede conducir a un rápido aumento en la tasa de evaporación y, por tanto, de la presión en el tanque.

20 Por lo tanto, el conjunto 200 sensor es operable para detectar estas condiciones, ya sea por medio de un gradiente o perfil de densidad diferente a través de la altura H interna del tanque 100 de almacenamiento, o por medio de detección de burbujas de gas que se producen por la ebullición en el interior del tanque (dado que el gas tiene una densidad menor que el líquido circundante, esto se verá como un pico en la respuesta en frecuencia de un sensor). Más adelante se describirán datos experimentales relacionados con esto.

25 En esta realización, los circuitos 204 de excitación están situados fuera del tanque 100 de almacenamiento. Por consiguiente, al menos una parte del conjunto 200 sensor está situada fuera del tanque 100 de almacenamiento. El oscilador 202 de cristal de cuarzo y los circuitos 204 de excitación están conectados por cableado que pasa a través de un orificio de paso que atraviesa la pared (no mostrado). Este sistema protege a todos los componentes electrónicos delicados de las temperaturas extremas en el interior del tanque 100 de almacenamiento. Sin embargo, los osciladores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo están constantemente bajo presión isostática en el interior del volumen V interno del tanque 100 de almacenamiento y, por consiguiente, no experimentan un gradiente de presión. Los beneficios de la colocación interna de los osciladores 202-1 – 202-N de cristal de cuarzo del conjunto 200 sensor son exclusivos para los dispositivos sensores de estado sólido tales como, por ejemplo, el oscilador 202 de cristal de cuarzo.

35 En un ejemplo alternativo, todo el conjunto 200 sensor podría estar situado en el interior del tanque 100 de almacenamiento. En este caso, sería necesario proporcionar un apantallamiento y/o aislamiento apropiados para proteger al menos algunos componentes electrónicos del conjunto 200 sensor del frío extremo del fluido criogénico en el interior del tanque 100 de almacenamiento.

40 Además, para uno o más osciladores 202 de cristal de cuarzo se puede proporcionar un elemento 209 de calentamiento. En la Figura 2 se muestra sólo un elemento 209 de calentamiento. El elemento 209 de calentamiento es aplicable cuando, por ejemplo, se vacía el tanque 100 o cuando el nivel L desciende hasta tal punto que un sensor 202 queda expuesto al aire atmosférico. En estas condiciones, la condensación de vapor de agua y/o de hielo sobre el sensor 202 frío puede producir imprecisiones y errores en la lectura del sensor 202, particularmente si el sensor 202 se vuelve a introducir a continuación en fluido criogénico líquido. Por lo tanto, el calentador 209 es operable para evaporar cualquier condensado o hielo para impedir esto.

50 De forma alternativa, el conjunto 200 sensor puede estar conectado a una antena (no mostrada) para comunicación remota con, por ejemplo, una estación base. Esto se explicará más adelante. En este caso, la antena puede estar situada fuera del tanque 100 de almacenamiento y conectada al conjunto 200 sensor por medio de un cable o conector equivalente. La propia antena puede estar adaptada y diseñada para utilizar cualquier protocolo de comunicación apropiado; por ejemplo, una lista no exhaustiva puede ser transmisión por RFID, por Bluetooth, por Infrarrojos (IR), transmisión inalámbrica según el estándar 802.11, por modulación en frecuencia (FM) o una red celular.

55 De forma alternativa, se puede implementar comunicación unifilar. La comunicación unifilar sólo necesita un único conductor metálico para comunicar: el camino "de retorno" del circuito lo proporciona el acoplamiento capacitivo a través del aire entre los dispositivos de comunicación. La persona con experiencia en la técnica sería rápidamente consciente de alternativas de la antena (y del hardware de transmisión asociado) que se podrían utilizar con las realizaciones explicadas en este documento.

60 Las Figuras 3 y 4 ilustran una primera realización de la presente invención en la forma de un segundo conjunto 300 sensor. El segundo conjunto 300 sensor está situado en una sección substancialmente vertical de la tubería 108. En la Figura 5 se muestra una sección plana a través de la tubería 108. En la Figura 6 se muestra una tubería 108 en sección transversal. La tubería 108 es operable para transportar fluidos criogénicos y, por ello, comprende superaislamiento 108a por vacío situado entre las paredes 108b interior y 108c exterior de la tubería 108.

El tercer conjunto 300 sensor comprende una pluralidad de osciladores 302-1 a 302-4 de cristal de cuarzo. En esta realización se utilizan cuatro osciladores 302-1 a 302-4 de cristal de cuarzo. En esta realización, los osciladores están situados de tal manera que el eje largo de cada oscilador se proyecta radialmente hacia dentro hacia el centro de la tubería 108 y perpendicularmente al flujo F de fluido (el cual, en la Figura 4, es hacia fuera del papel). Los osciladores 302-1 - 302-4 están también equiespaciados alrededor de la circunferencia interior de la tubería 108.

Sin embargo, la persona con experiencia en la técnica sería rápidamente consciente de que, si fuera necesario, se podrían usar otros números y otras configuraciones de osciladores. Por ejemplo, se podría colocar un oscilador central adicional en el centro de la tubería 108 para proporcionar cinco osciladores.

Cada oscilador 302 de cristal de cuarzo está conectado por cableado apropiado a un respectivo circuito 304 de excitación. En la Figura 4 se muestra sólo un único circuito 304 de excitación. Sin embargo, se debe entender que se proporciona un circuito 304 de excitación para cada oscilador 302 de cristal de cuarzo. También se puede proporcionar un procesador 306, ya sea independientemente o como parte de un circuito 304 de excitación. El conjunto 300 sensor puede estar alimentado por una fuente de batería o por una fuente de energía externa (por ejemplo, una conexión a una red de energía eléctrica). Estos detalles se describirán más adelante.

Para proporcionar conexiones electrónicas y físicas entre los circuitos 304 de excitación y los osciladores 302-1 a 302-4 de cristal de cuarzo, se proporcionan aisladores pasatapas 308 para cada oscilador 302-1 a 302-4 de cristal de cuarzo. Cada aislador pasatapas 308 permite que a través de él pase cableado de conexión, al tiempo que mantiene un sello estanco con suficiente aislamiento para permitir que se transfiera fluido criogénico a través de la tubería 108.

Las Figuras 5 y 6 ilustran una segunda realización de la presente invención en la forma del tercer conjunto 400 sensor. El tercer conjunto 400 sensor está situado en una sección substancialmente horizontal de la tubería 104. En la Figura 5 se muestra una sección plana a través de la tubería 104. En la Figura 6 se muestra la tubería 104 en sección transversal. La tubería 104 es operable para transportar fluidos criogénicos y, por ello, comprende aislamiento 104a por vacío situado entre las paredes 104b interior y 104c exterior de la tubería 104.

El tercer conjunto 400 sensor comprende una pluralidad de osciladores 402-1 a 402-4 de cristal de cuarzo. En esta realización, se utilizan cuatro osciladores 402-1 - 402-4 de cristal de cuarzo. En esta realización, los osciladores están situados de tal manera que el eje largo de cada oscilador se proyecta hacia dentro hacia el lado opuesto de la tubería 104 y perpendicularmente al flujo de fluido (el cual, en la Figura 6, es hacia dentro o hacia fuera del papel). Los osciladores 402-1 - 402-4 están también situados paralelos unos a otros alrededor del interior de la tubería 104.

En otras palabras, como se muestra en la Figura 5, los osciladores 402-1 a 402-4 de cristal de cuarzo están situados paralelos unos a otros de tal manera que los brazos de cada oscilador de cristal están situados planos al flujo F que viene en dirección a ellos. Como se muestra en la Figura 6, los osciladores 402-1 a 402-4 de cristal de cuarzo están situados de manera asimétrica alrededor de la pared 104b circunferencial interior de la tubería 104. En particular, un oscilador 402-2 está situado contiguo a la porción inferior de la tubería 104. Esto se debe a que, para una tubería horizontal, el efecto de gravedad puede provocar que el líquido criogénico fluya a lo largo de la superficie interior inferior de la tubería, con gas por encima. Colocando un oscilador en el fondo, o cerca del fondo, de la tubería 104, este líquido criogénico se puede medir directamente.

En común con la segunda realización, cada oscilador 402 de cristal de cuarzo está conectado a un respectivo circuito 404 de excitación por cableado apropiado. En la Figura 4 se muestra sólo un único circuito 404 de excitación. Sin embargo, se debe entender que se proporciona un circuito 404 de excitación para cada oscilador 402 de cristal de cuarzo. También se puede proporcionar un procesador 406, ya sea independientemente o como parte de un circuito 404 de excitación. El tercer conjunto 400 sensor puede estar alimentado por una fuente de batería o por una fuente de energía externa (por ejemplo, una conexión a una red de energía eléctrica). Estos detalles se describirán más adelante.

Para proporcionar conexiones electrónicas y físicas entre los circuitos 404 de excitación y los osciladores 402-1 a 402-4 de cristal de cuarzo, en común con la segunda realización, se proporcionan aisladores pasatapas 408 para cada oscilador 402-1 a 402-4 de cristal de cuarzo. Cada aislador pasatapas 408 permite que a través de él pase cableado de conexión, al tiempo que mantiene un sello estanco con suficiente aislamiento para permitir que se transfiera fluido criogénico a través del interior de la tubería 104.

Las realizaciones primera y segunda de la presente invención son operables para medir las propiedades físicas del flujo de fluidos criogénicos a lo largo de tuberías verticales y/u horizontales. Cuando un fluido bifásico (tal como por ejemplo un fluido criogénico) fluye a lo largo de una tubería, el flujo será diferente dependiendo de la proporción de las dos fases en el fluido, de la presión del fluido y del caudal.

Las Figuras 7a) a e) muestran diagramas que ilustran los diferentes flujos de un fluido bifásico que pueden aparecer a lo largo de una sección vertical de una tubería. Cuando tiene una calidad muy alta, se suele encontrar que el flujo

está en régimen de flujo burbuja ("*bubbly flow*") como se muestra en la Figura 7a). Este flujo está caracterizado por burbujas de vapor discretas dispersadas en una fase líquida continua. En flujo burbuja, el tamaño medio de las burbujas es generalmente pequeño en comparación con el diámetro del tubo.

5 La Figura 7b) ilustra flujo tapón ("*slug flow*"). Este flujo es aquel en el cual, a calidades ligeramente menores, las burbujas más pequeñas se pueden fusionar formando tapones ("*slugs*") que abarcan casi toda la sección transversal de la tubería.

10 La Figura 7c) muestra flujo de calidades intermedias y caudales menores, donde la tensión cortante del vapor en la interfaz líquido-vapor puede ser cercana al valor en el que justo equilibra los efectos combinados del gradiente de presión impuesto y la fuerza de volumen gravitatoria hacia abajo sobre la película de líquido. Como resultado de esto, el flujo de líquido tiende a ser inestable y oscilatorio. El flujo de vapor en el centro de la tubería fluye continuamente hacia arriba. Aunque la velocidad media de la película de líquido es hacia arriba, el líquido experimenta movimiento intermitente hacia arriba y hacia abajo. El flujo para estas condiciones es muy agitado, generando una interfaz muy irregular. A este flujo oscilatorio se le denomina flujo agitado ("*churn flow*").

15 Las Figuras 7d) y 7e) muestran mucha menor calidad de flujo, en el cual el flujo bifásico generalmente asume una configuración anular, fluyendo la mayoría del líquido a lo largo de la pared de la tubería y fluyendo el gas dentro del núcleo central. Como se muestra en la Figura 7d), a calidades intermedias, se puede observar uno de dos regímenes de adición. Si los caudales de líquido y de vapor son grandes, se observa un flujo de tipo anular con pesadas "volutas" ("*wisps*") de líquido atrapado que fluyen dentro del núcleo de vapor. Aunque esta es una forma de flujo anular, a veces se designa como un régimen diferente, al cual se denomina flujo anular "*wispy*". La Figura 7e) muestra flujo anular.

25 Las Figuras 8a) a f) muestran diagramas que ilustran los diferentes flujos de un fluido bifásico que se pueden aparecer a lo largo de una sección horizontal de una tubería. Una de las principales diferencias entre los regímenes observados para flujo horizontal y los observados para flujo vertical es que a menudo existe una tendencia a la estratificación del flujo en las tuberías horizontales, en las cuales las fuerzas gravitatorias imponen una asimetría sobre el flujo a través de la tubería. Con independencia del régimen de flujo, el vapor tiende a migrar hacia la parte superior del tubo al mismo tiempo que la porción inferior del canal transporta una mayor parte del líquido.

30 La Figura 8a) ilustra flujo burbuja, de muy alta calidad, el cual a menudo se observa para flujo horizontal. Sin embargo, como se ha indicado, las burbujas, debido a su flotabilidad, fluyen principalmente en la porción superior del tubo.

35 La Figura 8b) ilustra el caso en que la calidad del flujo es menor en el régimen burbuja, la fusión de pequeñas burbujas produce burbujas mayores de tipo pistón, las cuales fluyen dentro de la porción superior del tubo. A esto se le denomina régimen de flujo pistón ("*plug flow*").

40 La Figura 8c) muestra que, a bajos caudales y calidades algo menores, se puede observar flujo estratificado, en el cual líquido que fluye en el fondo de la tubería está separado de vapor en la porción superior de la tubería por una interfaz relativamente lisa.

45 La Figura 8d) muestra un caso en que, si el caudal aumenta y/o la calidad disminuye en el régimen de flujo estratificado, eventualmente la interfaz se vuelve inestable, con lo cual la interfaz se vuelve ondulada. Este tipo de flujo se categoriza como flujo ondulado ("*wavy flow*").

50 La Figura 8e) muestra el caso en que, a grandes caudales de líquido, la amplitud de las ondas puede crecer de manera que las crestas abarquen casi toda la anchura de la tubería, conformando efectivamente grandes burbujas de tipo tapón ("*slug*"). Debido a su flotabilidad, los tapones de vapor que fluyen a lo largo del tubo tienden a desviarse hacia la porción superior del tubo. En otros aspectos es idéntico al flujo tapón en tubos verticales y, por lo tanto, también se denomina flujo tapón ("*slug flow*").

55 Por último, la Figura 8f) muestra la situación en la que, a grandes velocidades de vapor y caudales de líquido moderados, se observa flujo anular para el flujo gas-líquido horizontal. Para estas condiciones, los efectos de flotabilidad pueden tender a hacer más delgada la película líquida existente en la porción superior de la pared del tubo y a hacerla más gruesa en la parte inferior.

60 Los sistemas de las realizaciones primera y segunda son operables para detectar los diferentes mecanismos de flujo en el interior de una tubería. Esto se puede hacer debido a la marcada diferencia entre la frecuencia de resonancia de los osciladores 302, 402 de cristal de cuarzo cuando se encuentran dentro de fluido criogénico líquido y cuando se encuentran dentro de fluido criogénico gaseoso. Además, el corto tiempo de respuesta de los osciladores 302, 402 de cristal de cuarzo permite realizar la clasificación del flujo en el interior de tuberías verticales y/u horizontales como se describirá más adelante.

65

Se describirá ahora la estructura del circuito 204, 304, 404 de excitación haciendo referencia a la Figura 9. Aunque la siguiente descripción está relacionada con el circuito 204 de excitación, se debe entender que lo que sigue también aplica a los circuitos 304, 404 de excitación.

5 El circuito 204 de excitación debe cumplir varios criterios específicos. En primer lugar, el oscilador 202 de cristal de cuarzo de la presente invención puede verse expuesto a un rango de presiones de fluido; potencialmente, las presiones pueden variar desde la presión atmosférica (cuando el tanque 100 de almacenamiento está vacío) hasta estar inmerso en un fluido criogénico líquido denso. De esta forma, es necesario que el cristal 202 de cuarzo funcione (y que se reencienda después de un periodo de no uso) en un gran rango de presiones y condiciones.

10 Por consiguiente, el factor de calidad (Q) del oscilador 202 de cristal de cuarzo variará considerablemente durante el uso. El factor Q es un parámetro adimensional relacionado con la tasa de amortiguamiento de un oscilador o resonador. De manera equivalente, puede caracterizar el ancho de banda de un resonador con respecto a su frecuencia central.

15 En general, cuanto mayor sea el factor Q de un oscilador, menor será la tasa de pérdida de energía con respecto a la energía almacenada del oscilador. En otras palabras, las oscilaciones de un oscilador de alto factor Q disminuyen de amplitud más lentamente en ausencia de una fuerza externa. Los resonadores excitados sinusoidalmente que tienen mayores factores Q resuenan con mayores amplitudes a la frecuencia de resonancia pero tienen un menor ancho de banda de frecuencias alrededor de la frecuencia para las cuales resuenan.

20 El circuito 204 de excitación debe ser capaz de excitar al oscilador 202 de cristal de cuarzo a pesar del factor Q cambiante. A medida que se va incrementando la presión en el tanque 100 de almacenamiento, la oscilación del oscilador 202 de cristal de cuarzo se volverá cada vez más amortiguada, y el factor Q disminuirá. El factor Q en disminución requiere que un amplificador del circuito 204 de excitación proporcione una mayor ganancia. Sin embargo, si se proporciona una amplificación demasiado grande, el circuito 204 de excitación, la respuesta procedente del oscilador 202 de cristal de cuarzo se puede hacer difícil de distinguir. En este caso, el circuito 204 de excitación puede simplemente oscilar a una frecuencia no relacionada, o a la frecuencia de un modo no fundamental del oscilador 202 de cristal de cuarzo.

25 Como limitación adicional, el circuito 204 de excitación debe ser de baja energía para que funcione con baterías pequeñas de baja energía durante un tiempo prolongado con o sin energía adicional tal como células fotovoltaicas.

30 Se describirá ahora el circuito 204 de excitación haciendo referencia a la Figura 9. Para excitar al oscilador 202 de cristal de cuarzo, el circuito 204 de excitación esencialmente toma una señal de tensión procedente del oscilador 202 de cristal de cuarzo, la amplifica, y envía esa señal de vuelta al oscilador 202 de cristal de cuarzo. La frecuencia de resonancia fundamental del oscilador 202 de cristal de cuarzo es función, básicamente, de los coeficientes de expansión y de contracción del cuarzo. Estos están determinados en general por el corte y el tamaño del cristal.

35 Sin embargo, a la frecuencia de resonancia también le afectan factores externos. Cuando la energía de las frecuencias de salida generadas coincide con las pérdidas en el circuito, se puede sostener una oscilación. El circuito 204 de excitación está diseñado para detectar y mantener esta frecuencia de oscilación. A continuación la frecuencia medida por el procesador 206 puede ser utilizada para calcular la propiedad apropiada del gas pedida por el usuario y, si se desea, puede ser enviada como salida a un medio de visualización adecuado (como se describirá más adelante).

40 El circuito 204 de excitación está alimentado por una fuente de energía de 6 V. La fuente de energía, en esta realización, comprende una batería de ión litio. Sin embargo, fuentes de energía alternativas serán rápidamente evidentes para la persona con experiencia en la técnica; por ejemplo, otros tipos de batería tanto recargables como no recargables y un sistema de células solares. Además, se puede utilizar energía eléctrica de la red. Esta solución es particularmente adecuada para instalaciones de tanque de almacenamiento fijo.

45 El circuito 204 de excitación comprende además un amplificador 210 de Emisor Común de par Darlington. Un par Darlington comprende una estructura compuesta que consiste en dos transistores NPN bipolares configurados de tal manera que la corriente amplificada por un primer transistor es amplificada más aún por el segundo. Esta configuración permite obtener una mayor ganancia de corriente en comparación con el caso en que se toma cada transistor por separado. De forma alternativa, se pueden utilizar transistores PNP bipolares.

50 El par Darlington 210 está colocado en una configuración de realimentación a partir de un amplificador 212 de Emisor Común de un único transistor (T_1). En la Figura 9 se muestra un transistor de unión bipolar NPN. Sin embargo, la persona con experiencia sería consciente de sistemas de transistor alternativos que se pueden utilizar; por ejemplo, un transistor de unión bipolar PNP o Transistores de Efecto de Campo de material Semiconductor de Óxido Metálico (MOSFETs).

55

60

El circuito 204 de excitación comprende un transistor T_2 NPN seguidor de emisor adicional que actúa como un amplificador 214 separador. El amplificador 214 separador está pensado para que funcione como un elemento separador entre el circuito y el ambiente externo.

5 Un condensador 216 está colocado en serie con el oscilador 202 de cristal de cuarzo. El condensador 216, en este ejemplo, tiene un valor de 100 pF y permite que el circuito 204 de excitación excite al oscilador 202 de cristal de cuarzo en situaciones en las que el cristal ha resultado contaminado, por ejemplo por sales u otros materiales depositados.

10 Se describirá ahora un circuito 240 de excitación alternativo haciendo referencia a la Figura 10. El circuito 240 de excitación se puede utilizar en lugar del circuito 204 de excitación descrito anteriormente. En contraste con el circuito 204 de excitación descrito anteriormente, el circuito 240 de excitación incluye un amplificador 242 de Transistor de Efecto de Campo de material Semiconductor de Óxido Metálico (MOSFET) en lugar del par Darlington del circuito de la Figura 9. El MOSFET 242 funciona como una entrada de alta impedancia que permite que la impedancia de entrada de la etapa amplificadora coincida con la alta impedancia del oscilador 202 de cristal de cuarzo. En otras palabras, el MOSFET 242 proporciona una ganancia unidad con una alta impedancia de entrada para reducir la carga eléctrica sobre el oscilador 202 de cristal de cuarzo.

20 La salida del amplificador 242 MOSFET de drenaje común se introduce en dos Amplificadores de Emisor Común de un único transistor (Q2, Q3) sucesivos. Resistencias R6 y R8 proporcionan realimentación negativa y corriente de polarización para los transistores. Los Amplificadores de Emisor Común 244 proporcionan una gran ganancia para amplificar las oscilaciones del oscilador 202 de cristal de cuarzo y, en esta realización, comprenden transistores de unión bipolares NPN. Sin embargo, la persona con experiencia sería consciente de sistemas de transistor alternativos que se pueden utilizar; por ejemplo, un transistor de unión bipolar PNP o MOSFETs.

25 Un condensador 246 está conectado entre el oscilador 202 de cristal de cuarzo y tierra. El condensador 246, en esta realización, es operable para incrementar la excitación del oscilador 202 de cristal de cuarzo.

30 Una resistencia 248 está conectada en serie con el oscilador 202 de cristal de cuarzo. La resistencia 248, en esta realización, tiene un valor de 56 kΩ y amortigua las oscilaciones del oscilador 202 de cristal de cuarzo para permitir que el circuito oscile dentro de un amplio rango de presiones con sólo cambios graduales en la forma de onda.

35 El circuito 240 de excitación está alimentado por una batería 250 de 3 V. La batería 250, en esta realización, comprende una batería de litio. Sin embargo, fuentes de energía alternativas serán rápidamente evidentes para la persona con experiencia en la técnica; por ejemplo, otros tipos de batería, tanto recargables como no recargables, y un sistema de células solares. De forma alternativa, se puede utilizar un sistema de alimentación a través de la red de suministro eléctrico después de rectificación a DC y de una reducción de tensión apropiada.

40 Se describirá ahora un circuito 260 de excitación alternativo haciendo referencia a la Figura 11. El circuito de excitación mostrado en la Figura 11 está configurado de manera similar a un oscilador de Pierce. Los osciladores de Pierce se conocen a partir de los osciladores de reloj de IC digital. Básicamente, el circuito 260 de excitación comprende un único inversor T digital (en la forma de un transistor), tres resistencias R_1 , R_2 y R_s , dos condensadores C_1 , C_2 , y el oscilador 202 de cristal de cuarzo.

45 En esta sistema, el oscilador 202 de cristal de cuarzo funciona como un elemento de filtro muy selectivo. La resistencia R_1 actúa como resistencia de carga para el transistor T. La resistencia R_2 actúa como resistencia de realimentación, polarizando el inversor T en su zona lineal de funcionamiento. Esto permite efectivamente que el inversor T funcione como un amplificador inversor de gran ganancia. Entre la salida del inversor T y el oscilador 202 de cristal de cuarzo se utiliza otra resistencia R_s para limitar la ganancia y para amortiguar oscilaciones indeseadas en el circuito.

50 El resonador 202 de cristal de cuarzo, en combinación con C_1 y C_2 forma un filtro pasa-banda de red Pi. Esto permite un desplazamiento de fase de 180 grados y una ganancia de tensión desde la salida a la entrada a aproximadamente la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo. El circuito 260 de excitación descrito anteriormente es fiable y barato de fabricar dado que comprende relativamente pocos componentes.

55 Como se ha explicado anteriormente, el conjunto 200 sensor puede incluir un procesador 206 que recibe entradas procedentes del oscilador 202 de cristal de cuarzo y del circuito 204 de excitación. El procesador 206 puede comprender un sistema apropiado, tal como un Circuito Integrado Específico para la Aplicación (ASIC) o una Matriz de Puertas Programable In-situ (FPGA). El procesador 206 está programado para calcular, visualizar y comunicar parámetros útiles a los usuarios del tanque 100 de almacenamiento.

60 Cuando se utiliza con el oscilador 202 de cristal de cuarzo, el procesador 206 se puede configurar para medir la frecuencia f o periodo de la señal procedente del circuito 204 de excitación. Esto se puede lograr, por ejemplo, contando oscilaciones durante un tiempo fijo, y convertir esa frecuencia en un valor de densidad utilizando un algoritmo o una tabla de consultas. Este valor se pasa al procesador 206, el cual está configurado para realizar,

basándose en las entradas suministradas, un cálculo para determinar la masa del gas dentro del tanque 100 de almacenamiento.

5 Opcionalmente, el procesador 206 puede estar diseñado para la producción en masa para que sea idéntico en todos los tanques de almacenamiento, con diferentes rasgos del software y del hardware habilitados para diferentes gases.

10 Además, el procesador 206 puede estar configurado para minimizar el consumo de energía por medio de la implementación de modos de espera o de "sueño", los cuales pueden cubrir al procesador 206 y a componentes adicionales tales como el circuito 204 de excitación y el oscilador 202 de cristal de cuarzo.

15 Se pueden implementar diferentes esquemas; por ejemplo, el procesador 206 puede estar en espera durante 10 de cada 11 segundos. Además, el procesador 206 puede controlar al oscilador 202 de cristal de cuarzo y al circuito 204 de excitación de tal manera que estos componentes se pongan en espera durante la mayor parte del tiempo, conmutándose sólo los componentes de mayor consumo de energía durante ½ segundo cada 30 segundos. De forma alternativa o adicional, los componentes de comunicación tales como una antena se pueden apagar cuando se desee o se pueden utilizar para activar los conjuntos sensores 200, 300, 400.

20 Se describirán ahora la teoría y el funcionamiento de los conjuntos sensores primero 200, segundo 300 y tercero 400, haciendo referencia a las Figuras 12 a 15.

25 El oscilador 202 de cristal de cuarzo tiene una frecuencia de resonancia que depende de la densidad del fluido dentro del cual está situado. La exposición de un oscilador de cristal de tipo diapasón oscilante a un gas produce un desplazamiento y un amortiguamiento de la frecuencia de resonancia del cristal (cuando se compara con la frecuencia de resonancia del cristal en el vacío). Existen varias razones para esto. Aunque existe un efecto de amortiguamiento del gas sobre las oscilaciones del cristal, el gas se adhiere a los brazos que vibran del oscilador 202 de cristal de tipo diapasón, lo cual incrementa la masa del oscilador. Esto conduce a una disminución de la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo de acuerdo con el movimiento de una viga elástica empotrada en un extremo:

30

$$1) \quad f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \frac{\rho}{M_0}}}$$

35 Donde f es la frecuencia de oscilación, f₀ es la frecuencia de oscilación en el vacío; ρ es la densidad del gas, y M₀ es una constante.

En casi todos los casos la densidad ρ será pequeña en comparación con M₀, de modo que la fórmula se puede aproximar mediante la ecuación lineal:

$$2) \quad f = f_0 \left(1 - \frac{\rho}{2M_0}\right)$$

40 la cual se puede volver a expresar en términos de la desviación en frecuencia Δf con respecto a f₀ como se expone en la ecuación 3):

$$3) \quad \Delta f = \frac{1}{2} \left(\frac{f_0}{M_0}\right) \rho$$

45 Por consiguiente, en una buena aproximación, el cambio de la frecuencia es proporcional al cambio de densidad del gas al cual está expuesto el oscilador de cristal de cuarzo. La Figura 12 muestra, para varios gases/mezclas de gases diferentes, que la frecuencia de resonancia del oscilador 202 de cristal de cuarzo varía linealmente en función de la densidad.

50

En general, la sensibilidad del oscilador 202 de cristal de cuarzo es tal que, por ejemplo, con gas Oxígeno (que tiene número atómico 32) a 250 bares se observa un cambio del 5% en la frecuencia en comparación con la frecuencia a presión atmosférica.

5 Sorprendentemente, el oscilador 202 de cristal de es particularmente apropiado para ser usado como un sensor de densidad para fluidos comerciales tales como fluidos criogénicos. En primer lugar, para detectar con precisión la densidad de un gas o líquido, es necesario que el gas o líquido esté libre de polvo y otros contaminantes. Generalmente esto es así con fluidos criogénicos comerciales, pero no con el aire, el agua, el aceite o en la generalidad de situaciones de monitorización de presión.

10 La medición de las propiedades físicas de fluidos bifásicos criogénicos de esta manera tiene varias ventajas sobre los sistemas conocidos. Por ejemplo, la densidad medida de acuerdo con realizaciones de la invención se corrige intrínsecamente por temperatura. En contraste, la medida de presión utilizando, por ejemplo, un manómetro de Bourdon, varía proporcionalmente con la temperatura absoluta. Por lo tanto, el presente sistema no requiere medición y/o corrección de temperatura como ocurre con los sistemas conocidos.

15 Además, la densidad del gas o líquido criogénico medida de acuerdo con una realización de la presente invención se corrige intrínsecamente por su compresibilidad Z. En un sistema convencional, por ejemplo en un manómetro de Bourdon, es necesario corregir por la compresibilidad del gas. Esto es particularmente importante a grandes presiones, donde la compresibilidad Z no es proporcional a la presión del gas de la manera esperada en un gas ideal.

20 La compensación automática por compresibilidad se ilustra haciendo referencia a las Figuras 13 y 14. La Figura 13 muestra una gráfica de masa de gas (en kg) sobre el eje Y en función de Presión (bar g) para Argón, Oxígeno y para una mezcla de Argón:Dióxido de Carbono. Como se muestra en la Figura 13, las masas de los diferentes gases varían cuando aumenta la presión. Además, a grandes presiones mayores de 250 bar g, deja de existir una relación lineal entre masa y presión.

25 En ejemplos, los conjuntos sensores 200, 300, 400 se pueden utilizar para determinar la densidad ρ en función del tiempo t y se puede utilizar esta información para interpretar condiciones en el interior del tanque 100 de almacenamiento (en el caso del ejemplo del tanque de almacenamiento no de acuerdo con la invención) y en el flujo de líquido bifásico a lo largo de una tubería (en el caso de las realizaciones primera y segunda de la invención).

30 Considerérese en primer lugar la medición de propiedades físicas en el interior del tanque 100 de almacenamiento por el primer conjunto 200 sensor. Como se ha explicado anteriormente, los osciladores 202-1 a 202-N de cristal de cuarzo son operables para resonar a una frecuencia que es proporcional a la densidad del fluido en el cual están inmersos. Por lo tanto, la matriz de osciladores 202-1 a 202-N proporcionados en el primer conjunto sensor son operables para medir propiedades del fluido en el interior del tanque 100 de almacenamiento tales como el nivel del líquido y la densidad del líquido a diferentes alturas dentro del tanque 100 de almacenamiento. Esto ayuda en la identificación de estratificación dentro del tanque 100 de almacenamiento como se ha descrito anteriormente.

35 Además, el corto tiempo de respuesta de los osciladores 202-1 a 202-N de cristal de cuarzo y las frecuencias de resonancia marcadamente diferentes de los osciladores 202-1 a 202-N de cristal de cuarzo cuando se encuentran dentro del gas/vapor o del líquido permite la caracterización del estado del fluido dentro del tanque 100 de almacenamiento. En otras palabras, es posible detectar, utilizando el primer conjunto 200 sensor, si el líquido dentro del tanque 100 de almacenamiento está hirviendo y, si es así, cuán vigorosamente. Esto puede proporcionar avisos de incrementos de presión potencialmente peligrosos dentro del tanque 100 de almacenamiento, permitiendo acción correctiva (tal como dejar salir el exceso de gas o de vapor) antes de que se produzcan daños estructurales en el tanque 100 de almacenamiento.

40 Como se ha descrito, en un fluido bifásico, existirán burbujas de gas en el líquido dentro del tanque 100 de almacenamiento. Si el líquido está hirviendo, entonces las burbujas de gas ascenderán hacia la superficie del líquido y, por consiguiente, pasarán por los osciladores 202-1 a 202-N de cristal de cuarzo. Por lo tanto, midiendo la frecuencia de resonancia (la cual es proporcional a la densidad) en función del tiempo, se pueden detectar las burbujas de gas a medida que éstas van pasando por cada oscilador 202-1 a 202-N de cristal de cuarzo.

45 Por lo tanto, para proporcionar una indicación del grado de ebullición del líquido, se pueden determinar propiedades tales como, de forma no exhaustiva: la proporción de gas a líquido por unidad de tiempo; el número de burbujas por unidad de tiempo; y el tamaño de las burbujas.

50 La Figura 15 ilustra un ejemplo de una medición de la frecuencia de resonancia de un oscilador 202 de cristal de cuarzo en un tanque de Nitrógeno Líquido. La Figura 15 muestra la frecuencia de resonancia (f) del oscilador 202 de cristal de cuarzo (sobre el eje Y) en kHz dibujada en función del tiempo (sobre el eje X) en milisegundos. El Nitrógeno Líquido está hirviendo vigorosamente y esto se puede ver en la Figura 15 como picos en la frecuencia de resonancia f en función del tiempo t .

55

- 5 Como se muestra, la rápida respuesta del oscilador 202 de cristal de cuarzo permite que se puedan detectar burbujas del orden de decenas de milisegundos. Sin embargo, cuando se está operando a muy alta velocidad, el oscilador 202 de cristal de cuarzo no tiene tiempo de estabilizarse completamente en el nuevo medio (es decir, la burbuja de gas que pasa a través de él). Por lo tanto, en algunos casos, una cifra de densidad obtenida mediante la frecuencia de resonancia pico medida cuando el oscilador está dentro de la burbuja de gas puede no conducir a una medición precisa de la densidad. Sin embargo, se puede realizar un análisis cuantitativo para determinar características del comportamiento del fluido.
- 10 Como se muestra en la Figura 15, se puede identificar un nivel umbral T. El nivel umbral T es un nivel predefinido por encima del cual se determina que se ha detectado una burbuja. Se puede implementar entonces un sistema mediante el cual se puede determinar la frecuencia f_b de burbujas. En otras palabras, se puede determinar el número de burbujas por unidad de tiempo para identificar las condiciones en el interior del tanque 100 de almacenamiento. El nivel umbral T se puede establecer en cualquier valor razonable, que excluya variaciones por error en la frecuencia de resonancia del componente líquido, al mismo tiempo que se detecte cualquier burbuja de gas.
- 15 Considérese ahora la medición y caracterización de flujo de fluido bifásico a lo largo de tuberías 104 horizontal y 108 vertical y medido utilizando los conjuntos 300, 400 sensores segundo y tercero.
- 20 Como se ha descrito anteriormente haciendo referencia a las Figuras 7 y 8, los diferentes estados de flujo de fluidos bifásicos dentro de tuberías horizontales y verticales se pueden caracterizar por tipos concretos de formación de burbujas. Las Figuras 16 a 18 ilustran diferentes situaciones de flujo medidas por los conjuntos 300, 400 sensores en tuberías verticales, aunque se obtienen gráficas muy similares para mediciones en tuberías horizontales.
- 25 La Figura 16 muestra Nitrógeno Líquido que fluye a través de una tubería llena de gas a caudales muy lentos. Se utiliza gas Helio para que en el interior de las burbujas de gas exista un gas que no condense. Sin embargo, se apreciará que también estarán presentes gas Nitrógeno u otros gases.
- 30 Como se muestra, el flujo está punteado por burbujas de gas que persisten durante aproximadamente 50 ms sobre los osciladores 302, 402 de cristal de cuarzo. Estas mediciones pueden corresponder a flujo relativamente anular tal como el mostrado en las Figuras 7d) y 7e) para tuberías verticales, y en las Figuras 8c), 8d) y 8f) para tuberías horizontales.
- 35 La Figura 17 muestra Nitrógeno Líquido que fluye a través de una tubería llena de gas Helio a caudales más rápidos. Como se muestra, el flujo es menos regular y el oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo detecta burbujas irregulares, las cuales persisten durante cantidades de tiempo variables. Esto puede corresponder a condiciones de flujo más caóticas en el interior de la tubería tales como las que se muestran en las Figuras 7a) y 7c) para tuberías verticales, y en la Figura 8a) para tuberías horizontales.
- 40 Por último, la Figura 18 muestra Nitrógeno Líquido que fluye a través de una tubería llena de gas Helio bajo condiciones en las que aparece flujo tapón (“slug flow”). La escala de la Figura 18 es mayor que la de las Figuras 15 a 17 y el eje X está en unidades de segundos.
- 45 Como se muestra, el flujo es muy regular y el oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo detecta “tapones” (“slugs”) de burbujas que duran aproximadamente 125 ms. La separación entre los “tapones” es también aproximadamente constante. Esto puede corresponder a condiciones de flujo tapón en el interior de la tubería tales como la que se muestra en la Figura 7b) para tuberías verticales, y como la que se muestra en la Figura 8b) para tuberías horizontales.
- 50 Estas mediciones se pueden interpretar de forma cualitativa y de forma cuantitativa. Por ejemplo, se puede determinar la frecuencia de burbujas f_b (es decir, el número de burbujas de gas por unidad de tiempo) y se puede determinar el tamaño de las burbujas (es decir, cuánto tiempo persiste la fracción gaseosa sobre el oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo). Esta información se puede utilizar para determinar la condición de flujo en el interior de las tuberías 104, 108 como se muestra en las Figuras 7 y 8.
- 55 Además, las mediciones procedentes de los conjuntos 300, 400 sensores se pueden utilizar para proporcionar información para ayudar en el control de otros dispositivos. Por ejemplo, una bomba criogénica operable para bombear fluido criogénico líquido puede alcanzar una condición de embalamiento si se ve expuesta a una cantidad significativa de gas dentro del flujo líquido bifásico. Por lo tanto, un conjunto 300, 400 sensor situado aguas arriba de la admisión de la bomba puede estar conectado electrónicamente a un controlador de la bomba de tal manera que, en cuanto se detecte una burbuja de gas, el motor de la bomba pueda reducir la velocidad para evitar una condición de embalamiento. Además, si un flujo de fluido contiene una proporción concreta de burbujas que puede provocar daños a la bomba (por ejemplo, cavitación), es posible detectar esto y controlar la bomba en consecuencia.
- 60 De forma alternativa, en la industria de los alimentos congelados se utiliza una tobera de pulverización de fluido criogénico para congelar criogénicamente comestibles. El patrón de pulverización de la boquilla de pulverización determinará el grado y condición de la congelación aplicada a los comestibles. Sin embargo, el patrón de
- 65

pulverización normal se verá perturbado por la presencia de gas y, por lo tanto, es importante conocer la cantidad de gas presente.

5 Es posible calcular caudal másico dentro de una tubería utilizando las realizaciones anteriores. Como se ha indicado anteriormente, por lo general los osciladores 302, 402 de cristal de cuarzo no tienen tiempo de establecer una densidad precisa para las burbujas de gas antes de que dichas burbujas de gas pasen por el sensor. Esto se debe a que un líquido tal como un fluido criogénico líquido (incluso uno de muy baja viscosidad) no tiene tiempo suficiente para salir del oscilador 302, 402 antes de que haya pasado la burbuja. Sin embargo, los inventores han descubierto que la masa de gas en el interior de las burbujas de gas se puede ignorar sin afectar excesivamente a la precisión de la medición del flujo másico.

15 Para medir flujo másico, es necesario determinar, por medio del medidor 350, 450 de flujo, el caudal volumétrico (dV/dt) del fluido bifásico. Entonces, utilizando el conjunto 300, 400 sensor, se pueden determinar la proporción de líquido a gas (B) y la densidad (ρ) del líquido. Se puede calcular entonces el caudal másico de acuerdo con la ecuación 4)

$$4) \quad \frac{\partial M}{\partial t} = B\rho \frac{\partial V}{\partial t}$$

20 Se describirá ahora un método haciendo referencia a la Figura 19. El método descrito más adelante es aplicable al ejemplo descrito anteriormente haciendo referencia a las Figuras 1 y 2.

Paso 500: Inicializar la medición

25 En el paso 500, se inicializa la medición de propiedades del fluido criogénico del tanque 100 de almacenamiento. Esta medición puede ser activada, por ejemplo, por un usuario presionando un botón situado en el exterior del tanque 100 de almacenamiento. De forma alternativa, la medición se puede iniciar por medio de una conexión remota, por ejemplo, mediante una señal transmitida a través de una red inalámbrica y que es recibida por el conjunto 200 sensor.

30 Como una alternativa o adición adicional, el conjunto 200 sensor se puede configurar para que se inicialice de forma remota o con un temporizador. El método avanza al paso 502.

Paso 502: Excitar al oscilador de cristal de cuarzo

35 Una vez inicializado, cada circuito 204 de excitación se utiliza para excitar al respectivo oscilador 202 de cristal de cuarzo. Durante la inicialización, el respectivo circuito 204 de excitación aplica una tensión AC de ruido aleatoria a través de los cristales 202-1 a 202-N. Al menos una parte de esa tensión aleatoria estará a una frecuencia adecuada para provocar que el cristal 202 oscile. El cristal 202 comenzará entonces a oscilar en sincronía con esa señal.

40 Por medio del efecto piezoeléctrico, el movimiento del oscilador 202 de cristal de cuarzo generará entonces una tensión en la banda de frecuencias de resonancia del oscilador 202 de cristal de cuarzo. El circuito 204 de excitación amplifica entonces la señal generada por el oscilador 202 de cristal de cuarzo, de tal manera que las señales generadas en la banda de frecuencias del resonador 202 de cristal de cuarzo dominen la salida del circuito 204 de excitación. La estrecha banda de resonancia del cristal de cuarzo filtra y elimina todas las frecuencias no deseadas y el circuito 204 de excitación excita entonces al oscilador 202 de cristal de cuarzo haciendo que vibre a la frecuencia de resonancia fundamental f . Una vez que el oscilador 202 de cristal de cuarzo se ha estabilizado a una frecuencia de resonancia concreta, el método avanza al paso 504.

Paso 504: Medir la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo

50 La frecuencia de resonancia f depende de las condiciones dentro del tanque 100 de almacenamiento. En la presente realización, el cambio de la frecuencia de resonancia Δf es proporcional en magnitud al cambio de densidad del gas o del líquido dentro del tanque 100 de almacenamiento y disminuirá a medida que aumente la densidad.

55 Para hacer una medición, la frecuencia del oscilador 202 de cristal de cuarzo se mide durante un periodo de aproximadamente 1 s. Esto es para permitir que la lectura se establezca y para que se cuenten suficientes oscilaciones para determinar una medida precisa. La medición de frecuencia se realiza en el procesador 206. El procesador 206 puede también registrar el tiempo, T_1 , en el que se inició la medición.

Una vez que se ha medido la frecuencia, el método avanza al paso 506.

Paso 506: Determinar la densidad del fluido

60 Una vez que se ha medido la frecuencia de cada oscilador 202 de cristal de cuarzo de forma satisfactoria en el paso 504, el procesador 206 calcula a continuación la densidad del fluido al nivel de ese oscilador 202-1 a 202-N de cristal de cuarzo concreto en el tanque 100 de almacenamiento.

El método avanza entonces al paso 508.

Paso 508: Determinar las propiedades físicas del fluido

5 En el paso 506, se determina la densidad del fluido (ya sea líquido o gas) a la altura de cada oscilador 202-1 a 202-N piezoeléctrico dentro de la pila vertical. Esto permite el cálculo de las propiedades físicas deseadas. Por ejemplo, el nivel de líquido dentro del tanque 100 de almacenamiento se podría determinar identificando cuáles de los osciladores 202-1 a 202-N están inmersos en líquido y cuáles no.

10 De forma alternativa o adicional, se puede identificar la densidad del líquido a diferentes profundidades. Esto se puede utilizar para identificar diferentes densidades de capa y para identificar estratificación, la cual puede conducir a condiciones inseguras en el tanque.

Paso 510: Almacenar los resultados de la medición

15 Una vez que se han calculado las densidades o los gradientes de densidad, los respectivos valores de densidad se podrían simplemente grabar en una memoria interna asociada al procesador 206 del conjunto 200 sensor para su posterior recuperación. Como una alternativa adicional más, los datos en el instante T_1 se podrían almacenar en una memoria local a dicho procesador 206.

20 El método avanza entonces al paso 512

Paso 512: Comunicar resultados

25 Como un paso opcional, los parámetros físicos (por ejemplo, nivel de llenado, estratificación en el tanque) se pueden visualizar de varias maneras. Por ejemplo, una pantalla unida al tanque 100 de almacenamiento podría visualizar la masa de gas contenida dentro del tanque 100 de almacenamiento. En la alternativa, las mediciones se podrían comunicar a distancia a una estación base o a un medidor situado sobre un accesorio contiguo.

Paso 514: Apagar el conjunto sensor

30 No es necesario mantener al conjunto 200 sensor operativo en todo momento. Al contrario, es beneficioso reducir el consumo de energía apagando el conjunto 200 sensor cuando no se esté utilizando. Esto alarga la vida de la batería si se utiliza una, o reduce el consumo de energía si está conectado a una red de suministro eléctrico.

35 La configuración del circuito 204 de excitación permite que el oscilador 202 de cristal de cuarzo pueda ser reiniciado incluso si está sumergido en líquido dentro del tanque 100 de almacenamiento. Por lo tanto, el conjunto 200 sensor se puede apagar como y cuando sea necesario para ahorrar energía.

40 Se describirá ahora, haciendo referencia a la Figura 20, un método de acuerdo con una realización de la presente invención. El método descrito más adelante es aplicable a las realizaciones primera y segunda descritas anteriormente haciendo referencia a la Figura 1 y a las Figuras 3 a 6,

Paso 600: Inicializar la medición

45 En el paso 600, se realiza la medición de propiedades del fluido criogénico en un conducto tal como la tubería 104 o la tubería 108. Esta medición puede ser activada, por ejemplo, por un usuario presionando un botón situado en el exterior del respectivo conjunto 300, 400 sensor. De forma alternativa, la medición puede ser iniciada por medio de una conexión remota, por ejemplo, una señal transmitida a través de una red inalámbrica y recibida por el respectivo conjunto 300, 400 sensor.

50 Como una alternativa o adición adicional, el conjunto 300, 400 sensor se puede configurar para que se inicialice de forma remota o con un temporizador. El método avanza al paso 602.

Paso 602: Excitar al/a los oscilador(es) de cristal de cuarzo

55 Una vez inicializado, cada circuito 304, 404 de excitación se utiliza para excitar al respectivo oscilador 302-1 - 302-4, 402-1 - 402-4 de cristal de cuarzo. Durante la inicialización, el respectivo circuito 304, 404 de excitación aplica una tensión AC de ruido aleatoria a través de los cristales 302-1 - 302-4, 402-1 - 402-4. Al menos una parte de esa tensión aleatoria estará a una frecuencia apropiada para provocar que los cristales 302-1 - 302-4, 402-1 - 402-4 oscilen. Los cristales 302-1 - 302-4, 402-1 - 402-4 comenzarán entonces a oscilar en sincronía con esa señal.

60 Por medio del efecto piezoeléctrico, el movimiento del oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo generará a continuación una tensión en la banda de frecuencias de resonancia del oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo. El circuito 304, 404 de excitación amplifica entonces la señal generada por el oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo, de tal manera que las señales generadas en la banda de frecuencias del resonador 302, 402 de cristal de cuarzo dominen la salida del circuito 304, 404 de excitación. La estrecha banda de resonancia de los filtros de cristal de cuarzo filtra y elimina todas las frecuencias indeseadas y el circuito 304, 404 de excitación excita entonces al oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo haciendo que vibre a la frecuencia de resonancia fundamental f . Una vez que el oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo se ha estabilizado a una frecuencia de resonancia concreta, el método avanza al paso 604.

Paso 604: Medir la frecuencia de resonancia de los osciladores de cristal de cuarzo

La frecuencia de resonancia f depende de las condiciones dentro del conducto en el cual está situado el conjunto 300, 400 sensor. En la presente realización, el cambio de la frecuencia de resonancia Δf es de magnitud proporcional al cambio de densidad del gas o del líquido dentro del tanque 100 de almacenamiento y disminuirá a medida que aumente la densidad. Por lo tanto, se observará un cambio de densidad apreciable cuando los osciladores 302, 402 están expuestos a la fracción gaseosa del fluido bifásico en vez de a la fracción líquida.

La medición de frecuencia se realiza en el procesador 306, 406. El procesador 306, 406 puede también registrar el instante, T_1 , en el que comenzó la medición, y puede grabar mediciones durante un periodo de tiempo posterior predeterminado.

Una vez que se ha medido la frecuencia, el método avanza al paso 606.

Paso 606: Determinar las propiedades físicas del fluido

Una vez que en el paso 604 se ha medido de forma satisfactoria la frecuencia de cada oscilador 302, 402 de cristal de cuarzo, el procesador 306, 406 es entonces operable para calcular los parámetros deseados.

Cada conjunto 300, 400 sensor comprende, en las realizaciones descritas, cuatro osciladores 302, 402. Para obtener propiedades físicas del fluido que se está midiendo, los procesadores 306, 406 determinan la media de las frecuencias de resonancia de los cuatro respectivos osciladores 302, 402. De forma alternativa, se pueden usar otros métodos de procesamiento o numéricos (como por ejemplo medias ponderadas) o se pueden usar las cuatro medidas de manera independiente.

En un sistema, se puede utilizar el nivel T umbral para detectar cuándo un oscilador 302, 402 está dentro de una burbuja de gas. El nivel T umbral se puede almacenar en el procesador 306, 406 y se puede introducir manualmente o puede obtenerse mediante un proceso de calibración.

El procesador 306, 406 puede entonces registrar datos relacionados con el tiempo en que el oscilador 302, 402 está dentro de gas y el tiempo en que el oscilador 302, 402 está dentro de líquido. Después de un periodo de medición predeterminado (por ejemplo, del orden de segundos) el procesador 306, 406 puede determinar la proporción de fluido que es gas y la proporción que es líquido. Esto se puede determinar como un porcentaje para ser usado en el cálculo expuesto en la ecuación 4).

De forma alternativa o adicional, se puede monitorizar el patrón de burbujas de gas, y la frecuencia y/o tamaño de las burbujas pueden ser registrados por el procesador 306, 406 para determinar características del flujo.

De forma alternativa o adicional, el procesador 306, 406 puede calcular la densidad del líquido utilizando la frecuencia del nivel del líquido de los osciladores 302, 402.

El método avanza entonces al paso 608.

Paso 608: Determinar el caudal volumétrico

Este paso es opcional y sólo se realizará si se necesita el caudal másico. El medidor 350, 450 de flujo se proporciona para medir caudal volumétrico. El medidor 350, 450 de flujo comprende una turbina u otro sistema motriz que genera una señal proporcional al caudal del fluido bifásico. El caudal volumétrico se comunica entonces al procesador 306, 406.

El método avanza al paso 610.

Paso 670: Determinar el caudal másico

De nuevo, el paso 610 es opcional y condicional a que se realice el paso 608. En el paso 608, se determina el caudal volumétrico. En el paso 610, esta información se utiliza en el procesador 306, 406, junto con la medición de la densidad del líquido del paso 606 y la proporción de gas a líquido en el fluido bifásico, para calcular el caudal másico del fluido de acuerdo con la ecuación 4).

El método avanza a continuación al paso 612.

Paso 612: Comunicar resultados

Como un paso opcional, los parámetros físicos (por ejemplo, tipo de flujo, caudal másico, densidad del líquido) se pueden visualizar de varias formas. Por ejemplo, una pantalla unida al conjunto 300, 400 sensor podría visualizar los datos relevantes. En la alternativa, las mediciones se podrían comunicar a distancia a una estación base o a un medidor situado sobre un accesorio contiguo.

El método avanza entonces al paso 614.

Paso 614: Apagar el conjunto sensor

No es necesario mantener al conjunto 300, 400 sensor operativo en todo momento. Al contrario, es beneficioso reducir el consumo de energía apagando el conjunto 300, 400 sensor cuando no se esté utilizando. Esto alarga la vida de la batería si se utiliza una, o reduce el consumo de energía si está conectado a una red de suministro eléctrico.

5 Variaciones de las realizaciones anteriores resultarán evidentes para la persona con experiencia. La configuración precisa de los componentes hardware y software puede ser diferente y seguir estando todavía dentro del alcance de la presente invención. La persona con experiencia sería fácilmente consciente de configuraciones alternativas que se podrían utilizar.

10 Por ejemplo, las realizaciones anteriormente descritas han utilizado un oscilador de cristal de cuarzo que tiene una frecuencia fundamental de 32,768 kHz. Sin embargo, se pueden utilizar cristales que funcionen a frecuencias alternativas. Por ejemplo, con las realizaciones descritas anteriormente se pueden utilizar osciladores de cristal de cuarzo que funcionen a 60 kHz y a 100 kHz. En la Figura 21 se muestra una gráfica que muestra el cambio de la frecuencia con la densidad para diferentes cristales. Como ejemplo adicional, se podría utilizar un oscilador de cristal que funcione a una frecuencia de 1,8 MHz.

15 El funcionamiento a frecuencias mayores permite monitorizar la presión con mayor frecuencia porque para muestrear un número dado de ciclos se necesita un periodo de tiempo más corto. Además, los cristales de mayor frecuencia permiten utilizar un ciclo de trabajo más corto en un modo "de sueño" de un cristal. A modo de explicación, en la mayoría de los casos, el cristal y el circuito de excitación pasarán la mayor parte del tiempo apagados, encendiéndose sólo durante un segundo o un tiempo similar cuando se necesita una medición. Esto puede suceder, por ejemplo, una vez por minuto. Cuando se utiliza un cristal de mayor frecuencia, se puede medir la presión con mayor rapidez. Por lo tanto, se puede reducir el tiempo durante el cual está operativo el cristal. Esto puede reducir el consumo de energía y mejorar al mismo tiempo la vida de la batería.

20 Además, las realizaciones anteriores se han descrito midiendo la frecuencia absoluta de un oscilador de cristal de cuarzo. Sin embargo, puede ser ventajoso medir el desplazamiento en frecuencia del sensor comparando esa frecuencia con un cristal de referencia de tipo idéntico pero que esté encerrado en un envase a vacío o a presión. El envase a presión puede contener gas a una densidad seleccionada, puede contener gas en condiciones atmosféricas o puede estar abierto a la atmósfera externa del tanque 100 de almacenamiento.

25 En la Figura 22 se muestra un conjunto 700 sensor apropiado. El conjunto 700 sensor comprende un primer oscilador 702 de cristal de cuarzo y un segundo oscilador 704 de cristal de cuarzo. El primer oscilador 702 de cristal de cuarzo es un cristal de referencia que está situado en el interior de un contenedor 706 sellado bajo vacío. El primer oscilador 702 de cristal de cuarzo es excitado por un circuito 708 de excitación.

30 El segundo oscilador 704 de cristal de cuarzo es un cristal similar al cristal 202 descrito en las realizaciones anteriores. El segundo oscilador 704 de cristal de cuarzo está expuesto al ambiente de gas existente dentro del volumen interno del tanque 100 de almacenamiento. El segundo oscilador 704 de cristal de cuarzo es excitado por un circuito 710 de excitación.

35 Esta comparación se puede realizar utilizando un circuito 712 mezclador electrónico que combina las dos señales de frecuencia y produce una salida a una frecuencia igual a la diferencia entre los dos cristales. Este sistema permite anular pequeños cambios debidos, por ejemplo, a temperatura.

40 Además, la circuitería utilizada en un tanque 100 de almacenamiento se puede simplificar porque sólo es necesario medir la diferencia de frecuencia. Además, esta técnica es particularmente adecuada para ser usada con un oscilador de cristal de alta frecuencia (MHz), en el que puede ser difícil medir directamente la frecuencia del cristal.

45 Además, toda la electrónica necesaria para medir y visualizar la densidad, la masa o el flujo másico no tiene por qué estar montada sobre el tanque de almacenamiento o dentro de él. Por ejemplo, las funciones electrónicas podrían estar divididas entre unidades montadas sobre el tanque de almacenamiento de manera permanente y unidades montadas en una estación de uso del cliente o montadas temporalmente en la salida del tanque de almacenamiento, por ejemplo en la posición utilizada normalmente para un medidor de flujo convencional.

50 Un ejemplo de este sistema se muestra haciendo referencia a la Figura 23. El sistema comprende un sistema 10 de fluido criogénico que comprende un tanque 100 de almacenamiento y conjuntos 200, 300, 400 sensores substancialmente como los descritos anteriormente con referencia a realizaciones anteriores.

55 Además, se proporciona una antena 804 para comunicación por medio de cualquier protocolo de comunicación remota apropiado; por ejemplo, Bluetooth, Infrarrojos (IR) o RFID. De forma alternativa, se puede utilizar comunicación unificar.

60 Como alternativa adicional, se pueden utilizar métodos de comunicación acústica. La ventaja de estos métodos es que la comunicación remota se puede efectuar sin que sea necesaria una antena externa.

5 Una unidad 850 de visualización está provista de una unidad 852 de datos. La unidad 852 de datos comprende una pantalla 854 de visualización y una antena 856 para comunicación con el sistema 10 de fluido criogénico. La pantalla 854 de visualización puede comprender, por ejemplo, una pantalla de tinta electrónica para minimizar el consumo de energía y maximizar la visibilidad de la pantalla. La unidad 852 de datos puede registrar diferentes parámetros medidos por los conjuntos 200, 300, 400 sensores.

10 Aunque las realizaciones anteriores se han descrito haciendo referencia al uso de un oscilador de cristal de cuarzo, la persona con experiencia sería rápidamente consciente de materiales piezoeléctricos alternativos que también se podría utilizar. Por ejemplo, una lista no exhaustiva puede incluir osciladores de cristal que comprendan: tantalato de litio, niobato de litio, borato de litio, berlinita, arseniuro de galio, tetraborato de litio, fosfato de aluminio, óxido de bismuto germanio, cerámicas de titanato de circonio policristalino, cerámicas de alto contenido en alúmina, material compuesto de óxido de silicio-zinc, o tartrato de dipotasio.

15 Además, aunque anteriormente se han ilustrado los fluidos bifásicos en relación a fluidos criogénicos, otros fluidos bifásicos son apropiados para ser usados con la presente invención. Por ejemplo, se pueden utilizar hidrocarburos de cadena corta hasta el dodecano ($C_{12}H_{26}$).

REIVINDICACIONES

1. Un método de medición de las propiedades físicas de un flujo de fluido bifásico utilizando una pluralidad de osciladores piezoeléctricos (302-1, 302-2, 302-3, 302-4; 402-1, 402-2, 402-3, 402-4) inmersos en el flujo de fluido bifásico, comprendiendo el fluido bifásico una fracción gaseosa y una fracción líquida dispersas dentro de un volumen concreto de fluido, comprendiendo el método:
- 5 a) medir (604) la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo durante un periodo de medición predeterminado; y
- 10 b) determinar (606), a partir de la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico, si el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida y determinar, para cada oscilador piezoeléctrico, la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa y la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción líquida, **caracterizado por que**, para caracterizar el fluido bifásico, se determina la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida medidas por cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo.
- 15 2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además, para cada oscilador piezoeléctrico, comparar la respectiva frecuencia de resonancia con una frecuencia umbral predeterminada para determinar si dicho respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida.
- 20 3. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 ó 2, en el cual al menos una propiedad física comprende la densidad de al menos el componente líquido del fluido bifásico.
- 25 4. Un método de acuerdo con la reivindicación 3, que comprende además los pasos de:
- c) medir el caudal volumétrico del fluido; y
- 30 d) determinar el caudal másico del fluido bifásico a partir de las mediciones de la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida y a partir de la densidad de la fracción líquida.
- 35 5. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además determinar, para cada oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de aparición de una fracción gaseosa y/o el tamaño de una fracción gaseosa.
- 40 6. Un método de acuerdo con la reivindicación 5, en el cual la frecuencia de aparición de una fracción gaseosa y/o el tamaño de una fracción gaseosa se utilizan para determinar el régimen de flujo de dicho fluido bifásico.
- 45 7. Un método de acuerdo con la reivindicación 5, en el cual la frecuencia de aparición de una fracción gaseosa y/o el tamaño de una fracción gaseosa se utilizan para determinar si dicho fluido bifásico está hirviendo.
- 50 8. Un conjunto (300; 400) sensor para medir las propiedades físicas de un flujo de fluido bifásico que comprende una fracción gaseosa y una fracción líquida dispersas en el interior de un volumen concreto de fluido, comprendiendo el conjunto sensor un procesador (306; 406) y una pluralidad de osciladores piezoeléctricos (302-1, 302-2, 302-3, 302-4; 402-1, 402-2, 402-3, 402-4) para su inmersión en el flujo de fluido bifásico, estando el procesador diseñado para medir la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo durante un periodo de medición predeterminado, para determinar, a partir de la frecuencia de resonancia de cada oscilador piezoeléctrico, si el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida, y para determinar, para cada oscilador piezoeléctrico, la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa y la cantidad de tiempo, durante dicho periodo de medición predeterminado, en la que el respectivo oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción líquida, **caracterizado por que** a partir de estas cantidades se determina la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida medidas por cada oscilador piezoeléctrico en función del tiempo para caracterizar el fluido bifásico.
- 55 9. Un conjunto sensor de acuerdo con la reivindicación 8, en el cual la citada pluralidad de osciladores piezoeléctricos están colocados alrededor del interior de un conducto a través del cual dicho fluido bifásico es operable para fluir.
- 60 10. Un conjunto sensor de acuerdo con la reivindicación 8 ó 9, en el cual el procesador es además operable para determinar si el oscilador piezoeléctrico está inmerso en una fracción gaseosa o en una fracción líquida por comparación de la frecuencia de resonancia con una frecuencia umbral predeterminada.
- 65 11. Un conjunto sensor de acuerdo con la reivindicación 8, 9 ó 10, en el cual el procesador está además diseñado para determinar la densidad de al menos el componente líquido del fluido bifásico.

12. Un medidor de flujo másico que comprende el conjunto sensor de la reivindicación 11, y un medidor de flujo operable para determinar el caudal volumétrico del fluido bifásico, siendo el medidor de flujo másico operable para determinar el caudal másico del fluido bifásico a partir de la proporción de la fracción gaseosa a la fracción líquida y a partir de la densidad de la fracción líquida.
- 5
13. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el cual el fluido bifásico es un fluido criogénico.
- 10
14. Un conjunto sensor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, en el cual el fluido bifásico es un fluido criogénico.

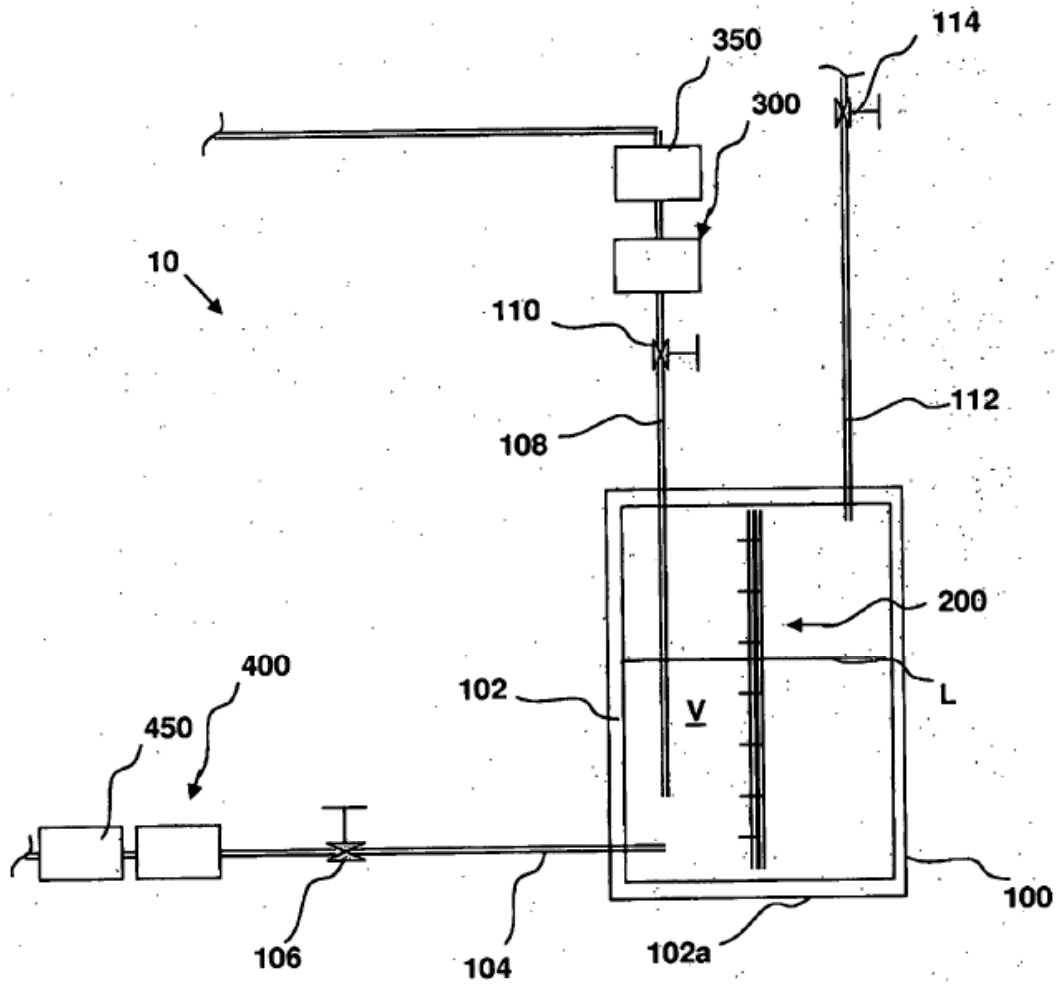


Fig. 1

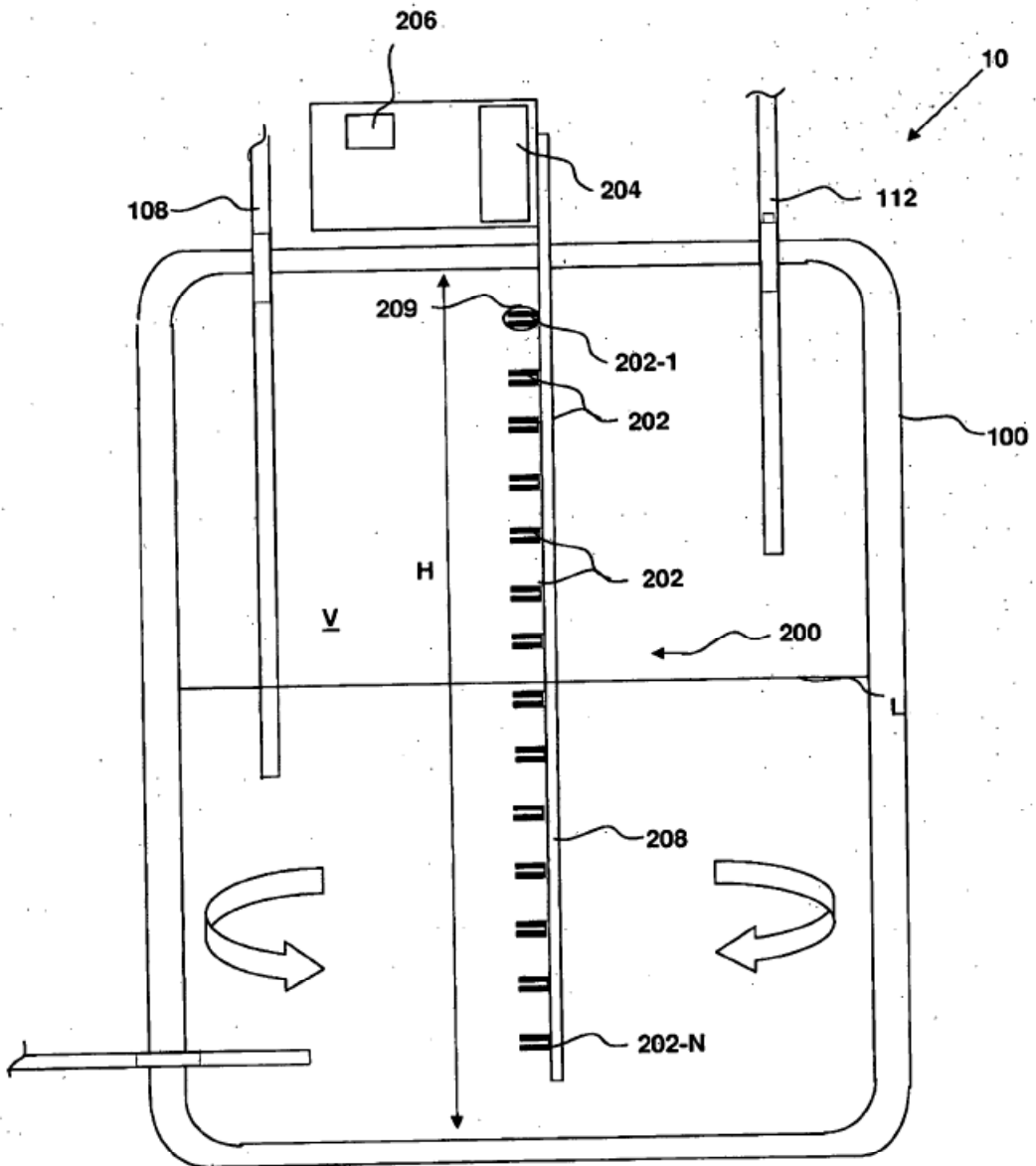
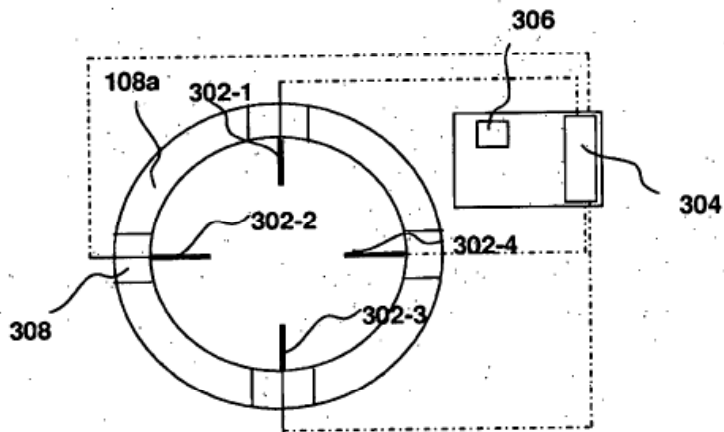
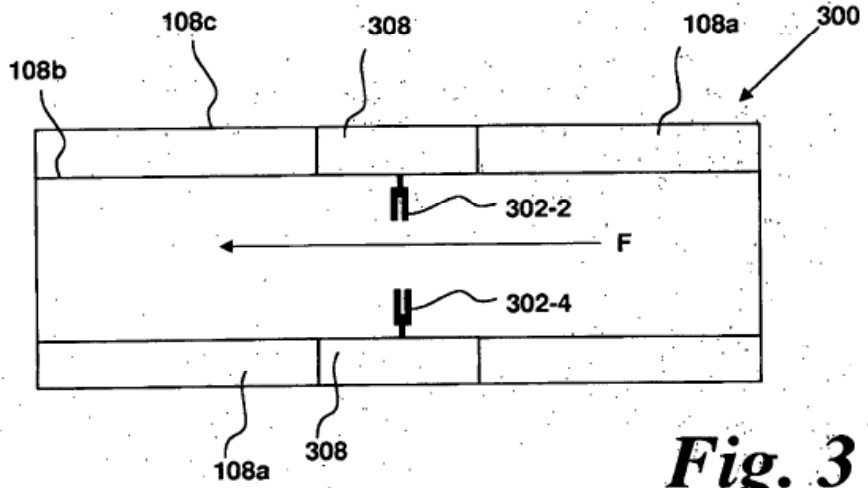


Fig. 2



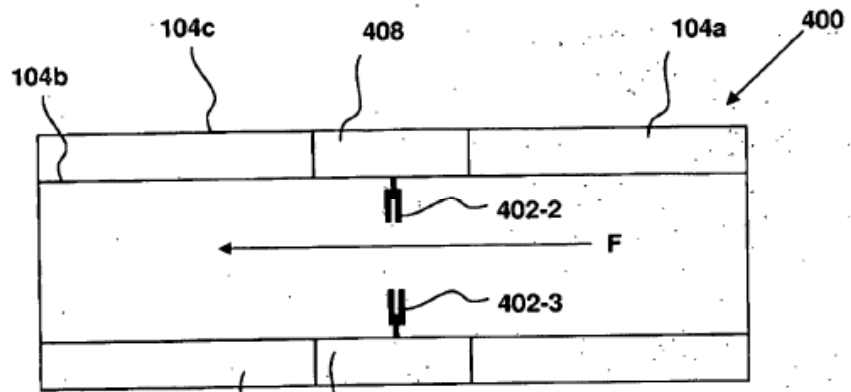


Fig. 5

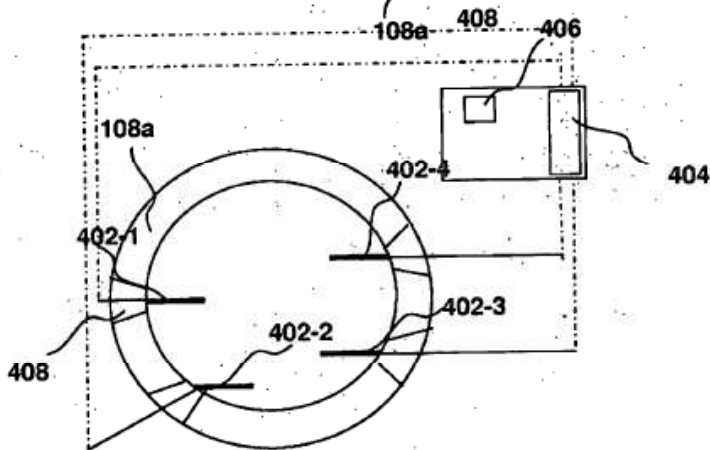
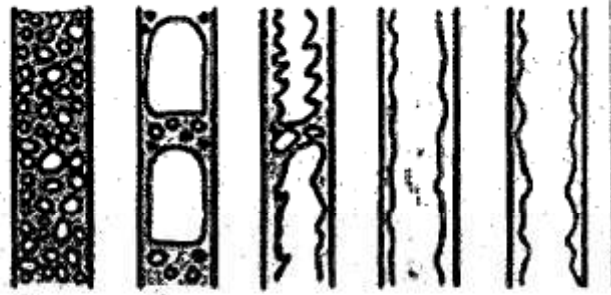


Fig. 6



a) b) c) d) e) Fig. 7

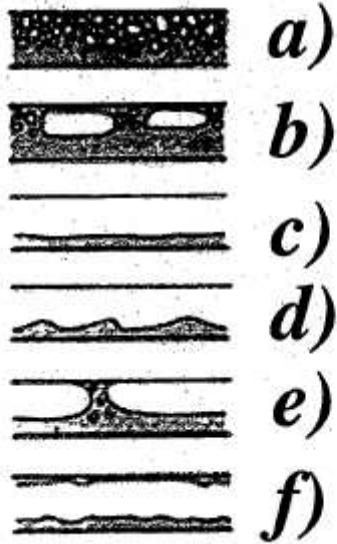


Fig. 8

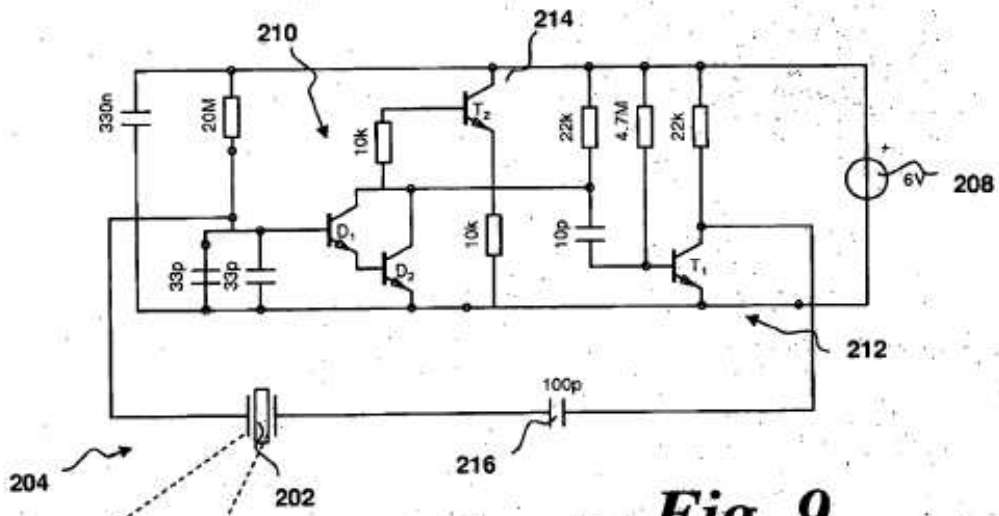


Fig. 9

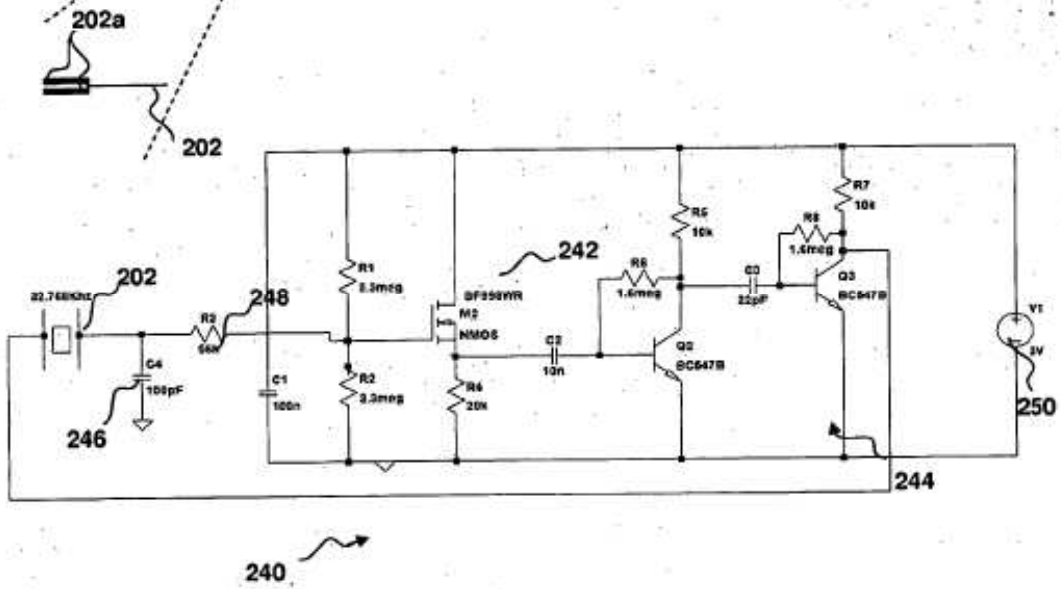


Fig. 10

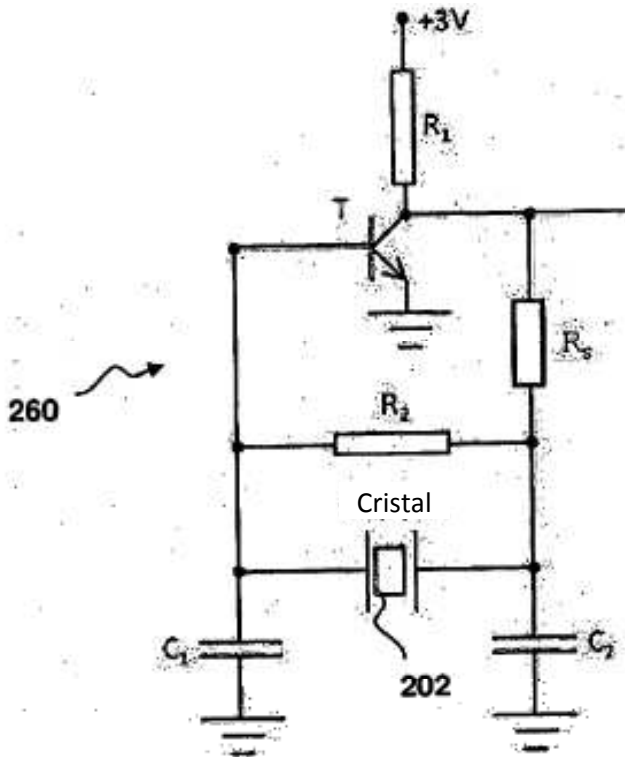


Fig. 11

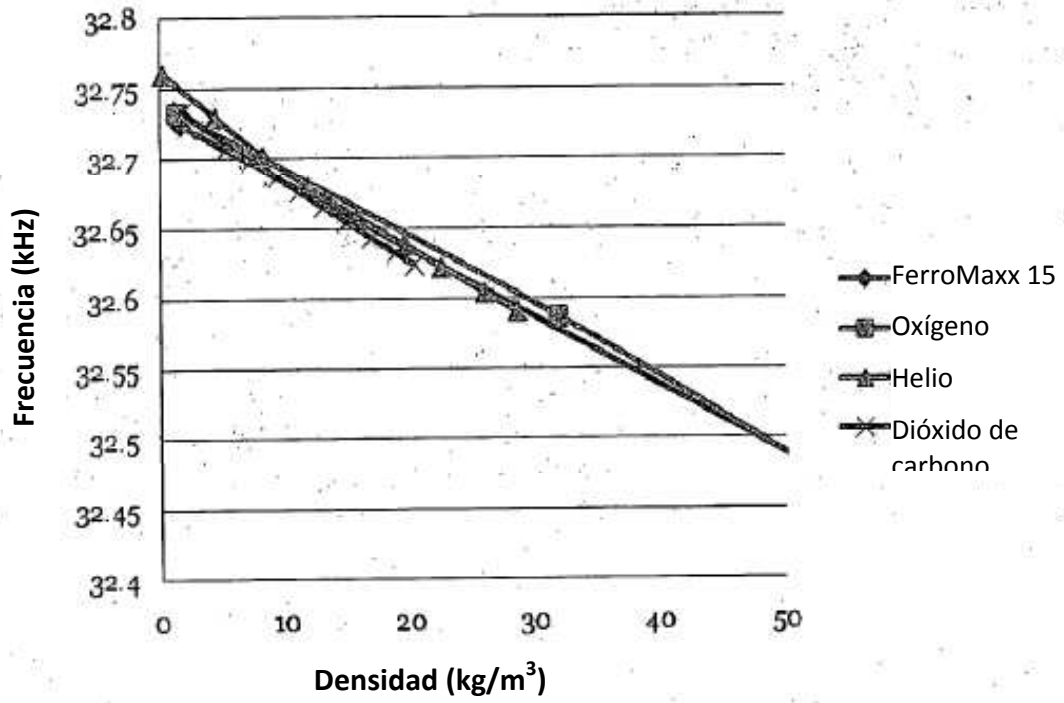


Fig. 12

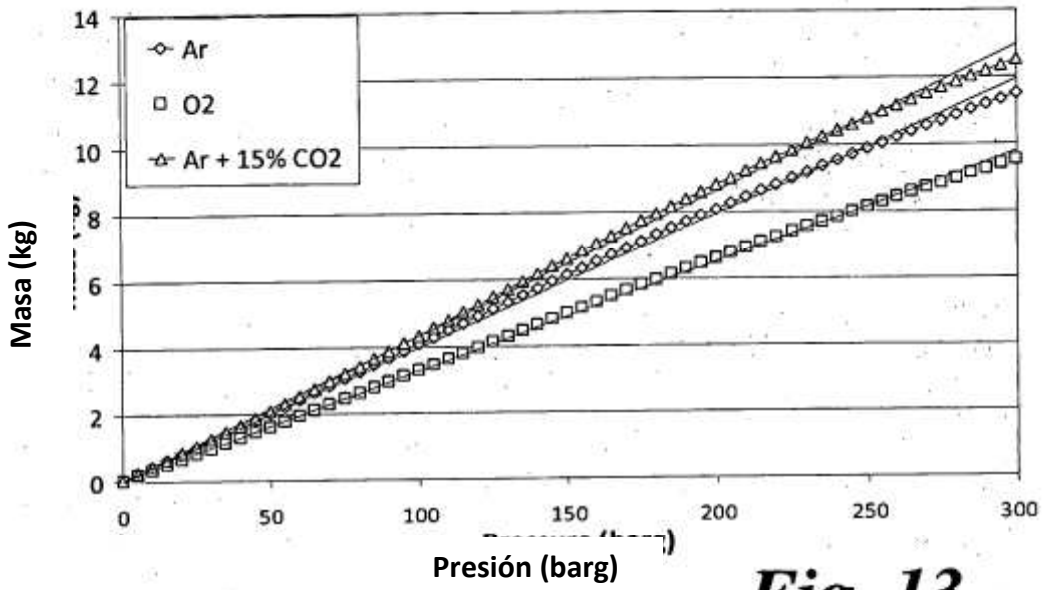


Fig. 13

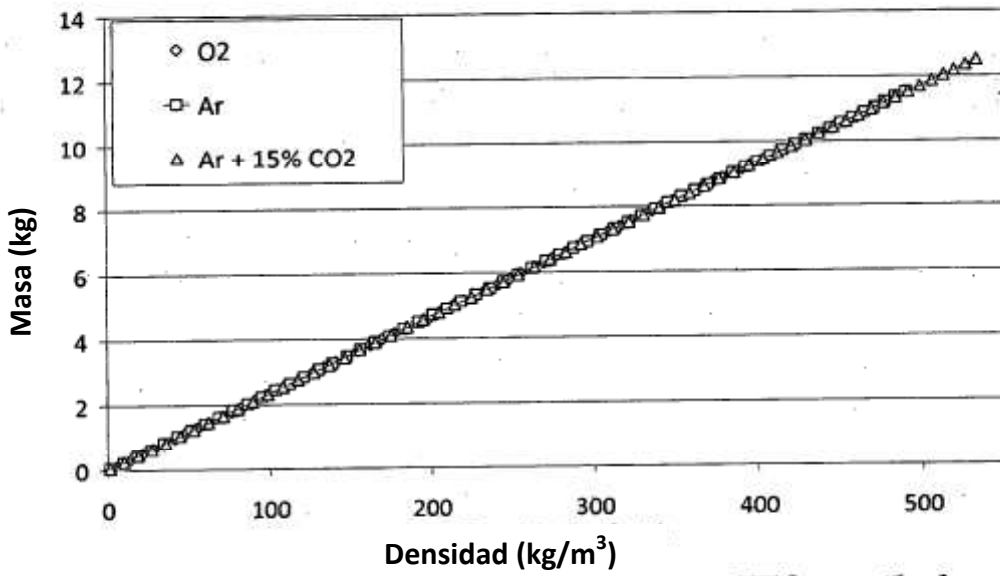


Fig. 14

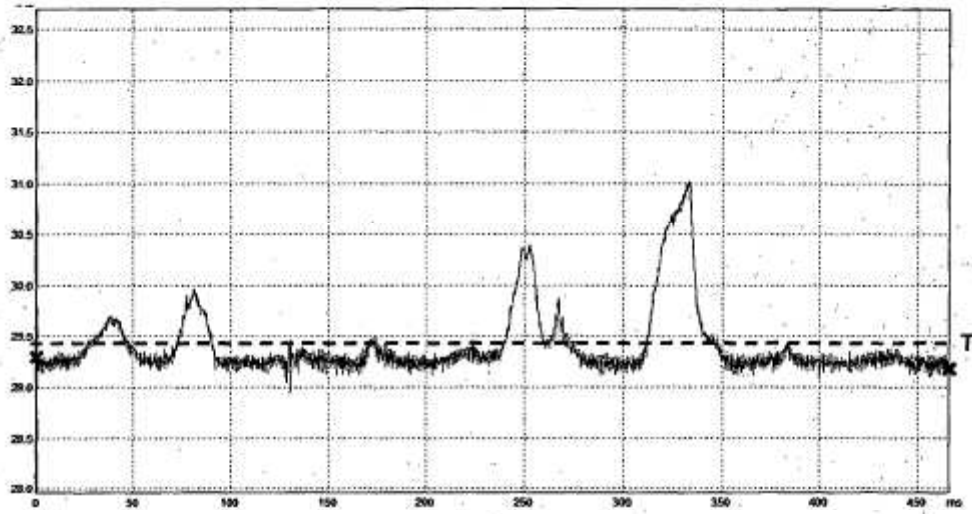


Fig. 15

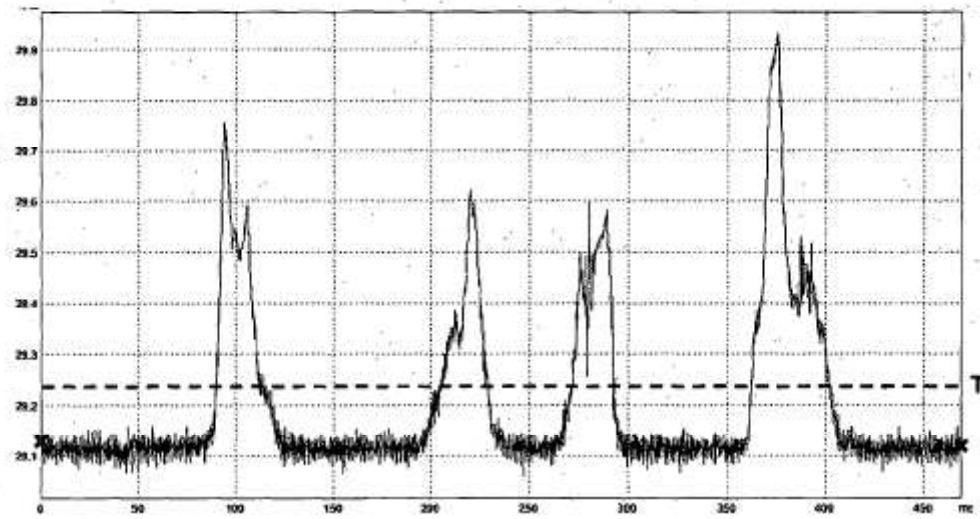


Fig. 16

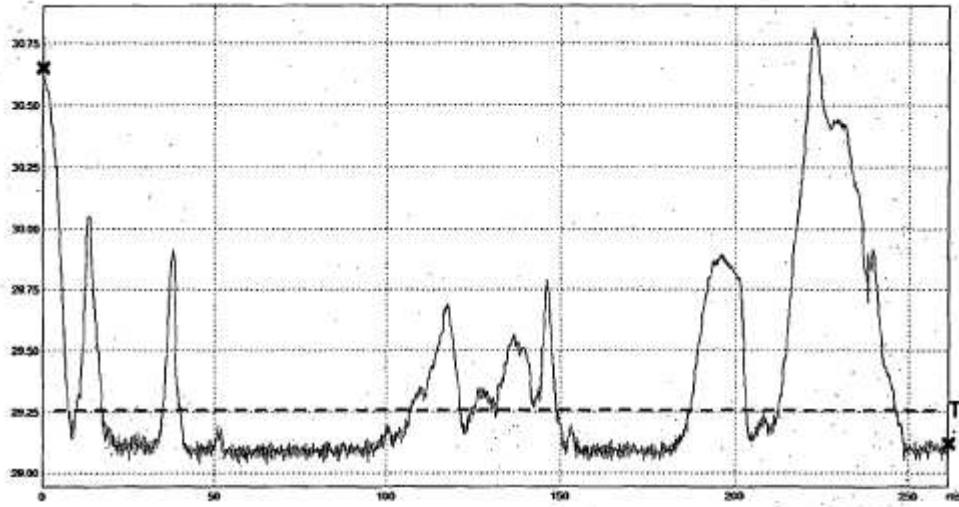


Fig. 17

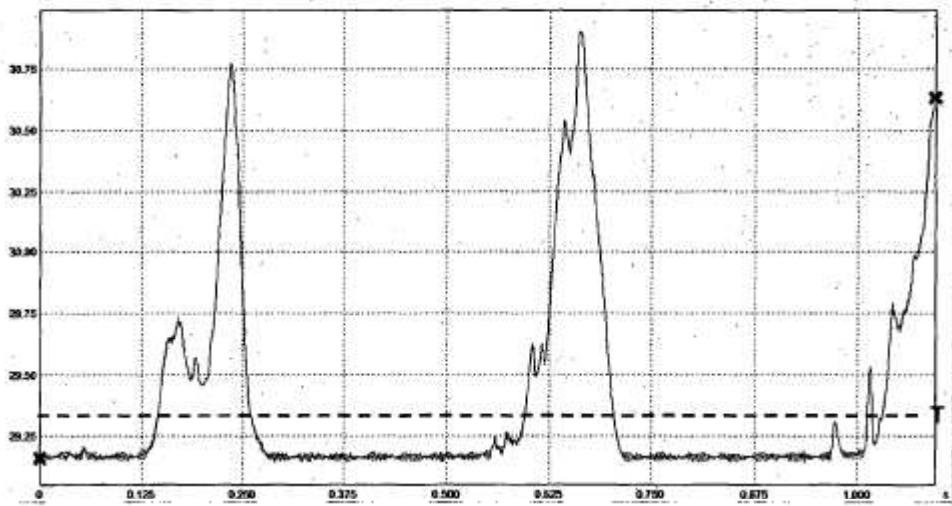


Fig. 18

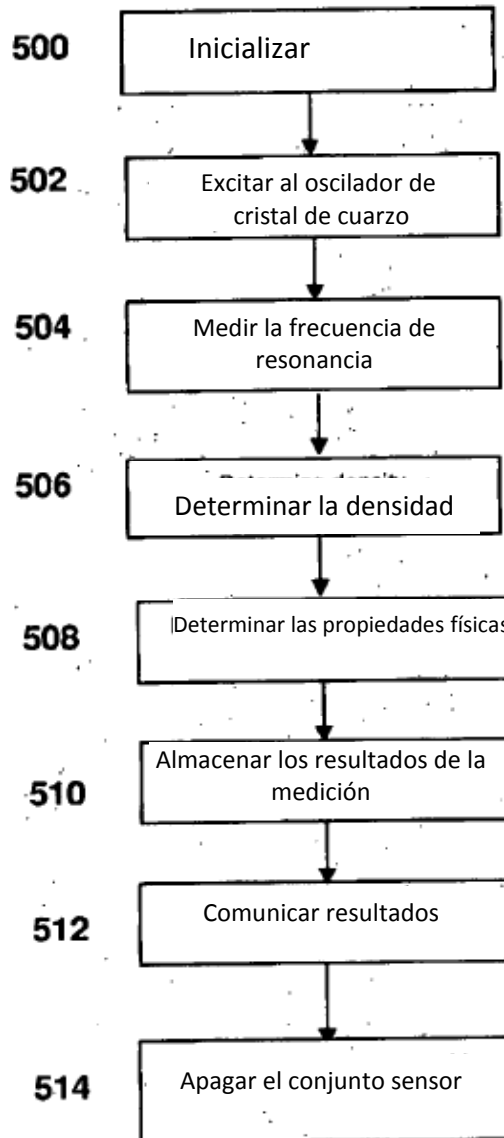


Fig. 19

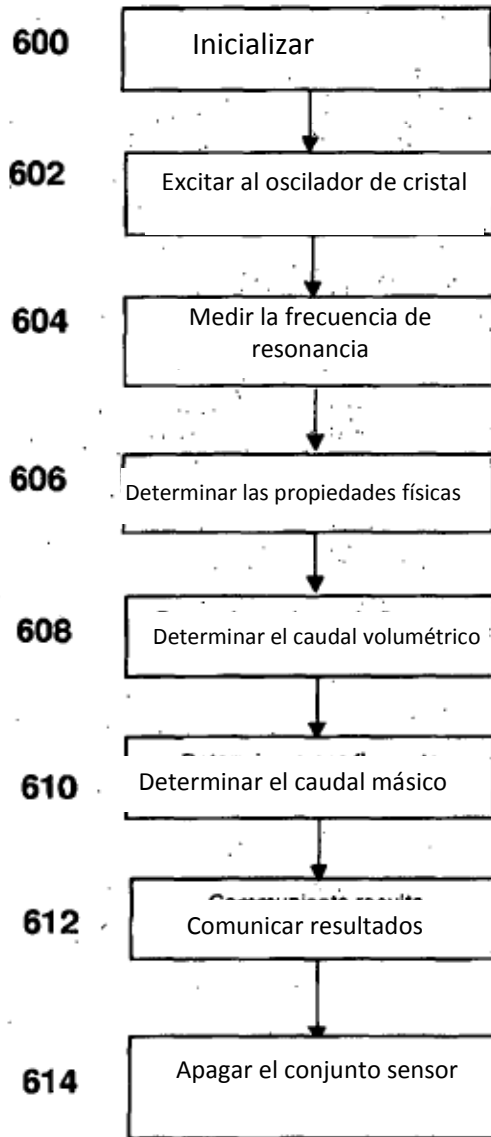


Fig. 20

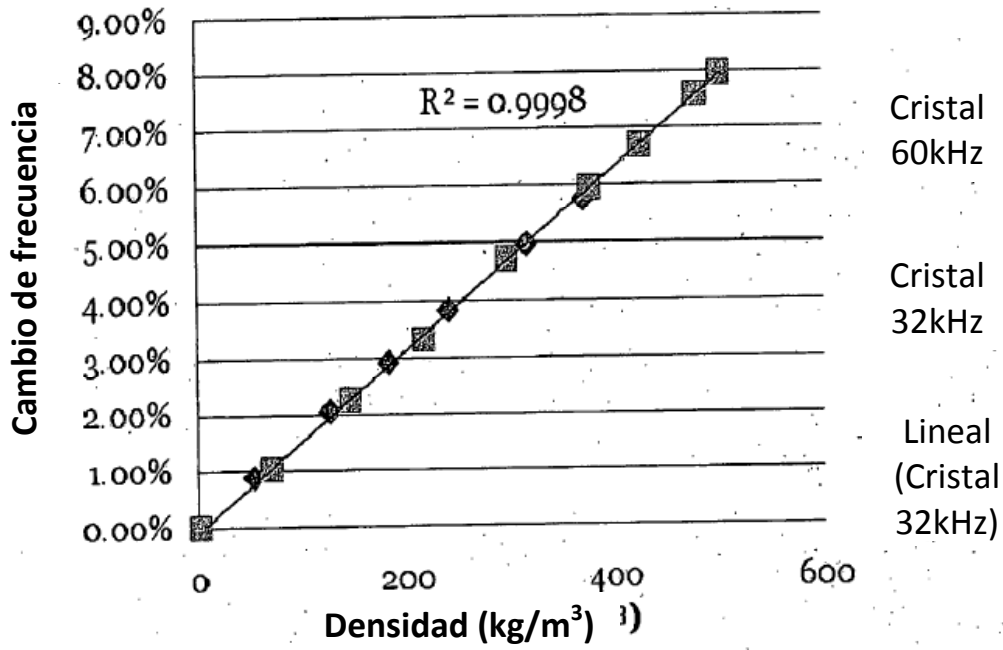


Fig. 21

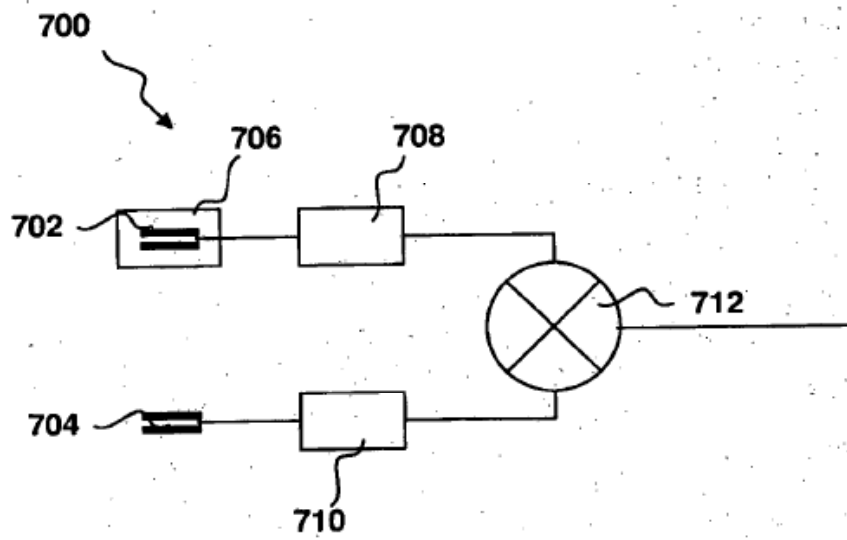


Fig. 22

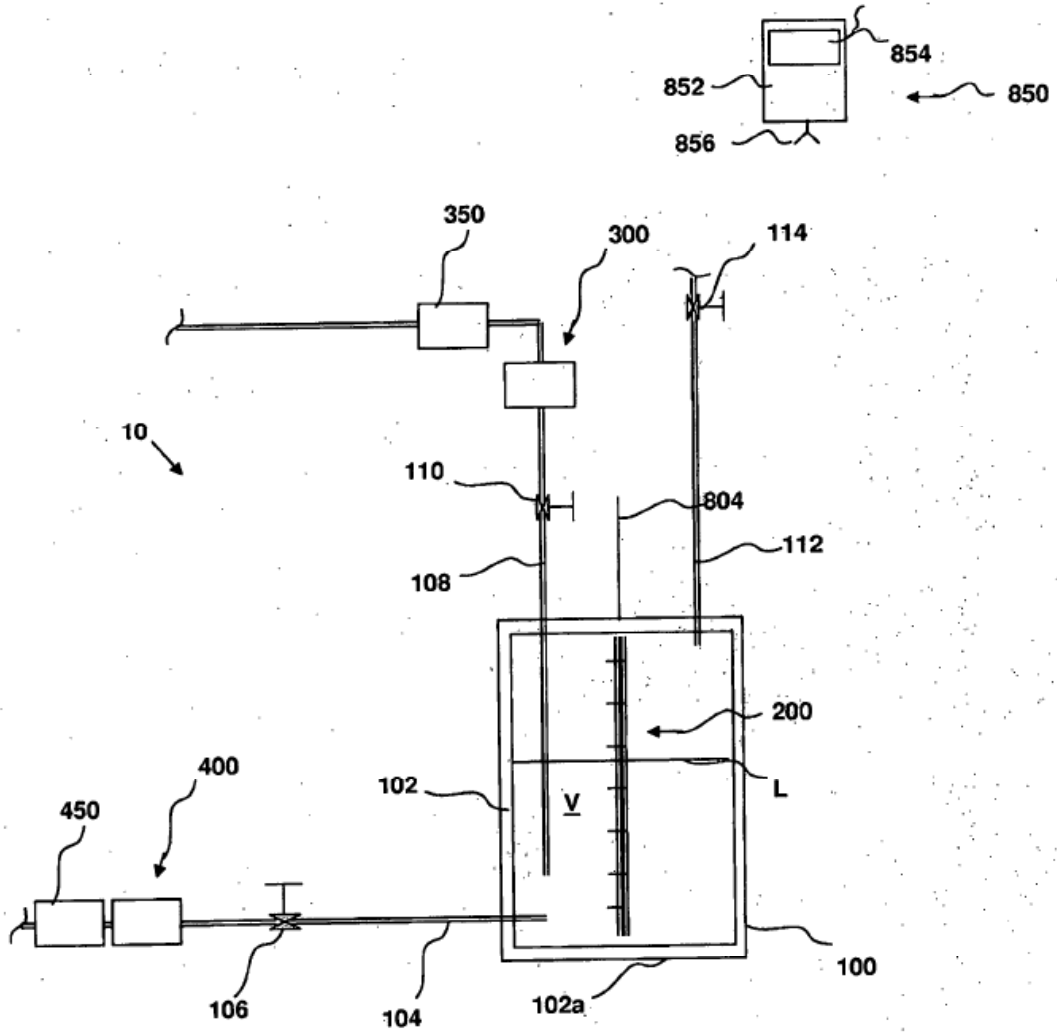


Fig. 23