

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 845 173**

51 Int. Cl.:

G01F 1/78 (2006.01)

G01F 15/00 (2006.01)

G05D 7/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.05.2012** **E 12169385 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.11.2020** **EP 2667160**

54 Título: **Procedimiento y aparato para regular el caudal másico de un gas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
26.07.2021

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

72 Inventor/es:
DOWNIE, NEIL ALEXANDER

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 845 173 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y aparato para regular el caudal másico de un gas

La presente invención se refiere a un procedimiento y aparato para regular el caudal másico de un gas. Más particularmente, la presente invención se refiere a un procedimiento y aparato para regular el caudal másico de un gas a través de un orificio de restricción de flujo usando dos osciladores piezoeléctricos.

Los procedimientos y aparatos descritos en esta memoria pueden aplicarse a sistemas en los que están presentes fluidos de presión relativamente alta (por ejemplo, aproximadamente 10 bares o más) tales como, por ejemplo, el suministro de fluidos en cilindros de alta presión o plantas de fabricación que utilizan fluidos de alta presión. La presente invención se refiere particularmente a gases "limpios", es decir gases con poca o ninguna impureza o contaminantes tales como vapor de agua o polvo.

La presente invención es particularmente aplicable a gases permanentes. Los gases permanentes son gases que no se pueden licuar solo con la presión y, por ejemplo, se pueden suministrar en cilindros a presiones de hasta 450 bares g (donde bar g es una medida de presión por encima de la presión atmosférica). Algunos ejemplos son argón y nitrógeno. Sin embargo, esto no debe tomarse como una limitación y se puede considerar que el término gas abarca un intervalo más amplio de gases, por ejemplo, tanto un gas permanente como el vapor de un gas licuado.

Los vapores de gases licuados están presentes sobre el líquido en un cilindro de gas comprimido. Los gases que se licuan bajo presión cuando se comprimen para llenarlos en un cilindro no son gases permanentes y se describen con mayor precisión como gases licuados a presión o como vapores de gases licuados. Como ejemplo, el óxido nitroso se suministra en un cilindro en forma líquida, con una presión de vapor de equilibrio de 44,4 bares g a 15 °C. Tales vapores no son gases permanentes o verdaderos ya que son licuables por presión o temperatura en condiciones ambientales.

Un cilindro de gas comprimido es un recipiente a presión diseñado para contener gases a altas presiones, es decir, a presiones significativamente mayores que la presión atmosférica. Los cilindros de gas comprimido se utilizan en un amplio intervalo de mercados, desde el mercado industrial general de bajo coste, pasando por el mercado médico, hasta aplicaciones de mayor coste, tales como la fabricación de productos electrónicos que utilizan gases especiales corrosivos, tóxicos o pirofóricos de alta pureza. Comúnmente, los contenedores de gas presurizado comprenden acero, aluminio o compuestos y son capaces de almacenar gases comprimidos, licuados o disueltos con una presión máxima de llenado de hasta 450 bares g para la mayoría de los gases y hasta 900 bares g para gases tales como el hidrógeno y el helio.

Para dispensar gases de manera efectiva y controlable desde un cilindro de gas u otro recipiente a presión, se requiere una válvula o regulador. A menudo, los dos se combinan para formar una válvula con regulador de presión integrado (VIPR). El regulador puede regular el flujo del gas de manera que el gas se dispense a una presión constante o variable por el usuario.

Para muchas aplicaciones, es deseable proporcionar un caudal constante de gas desde un cilindro de gas. Esto puede ser crítico para muchas aplicaciones; por ejemplo, aplicaciones médicas. Para proporcionar un caudal constante en un grado exacto, primero se debe medir el caudal y, a continuación, controlarlo en consecuencia.

Se conocen varias disposiciones de medición de flujo másico diferentes. Una clase de medidores de flujo másicos que se utilizan comúnmente en muchas aplicaciones industriales son los medidores de flujo másicos mecánicos. Tales medidores incluyen componentes mecánicos que se mueven o giran para medir el caudal másico. Uno de esos tipos es el medidor de flujo inercial (o medidor de flujo de Coriolis) que mide el flujo de fluido a través del efecto del fluido en las tuberías con forma. Los medidores Coriolis pueden manejar un amplio intervalo de caudales con alta precisión. Sin embargo, para detectar la tasa de flujo, se requieren sistemas complejos tales como funciones de actuación, detección, electrónicas y computacionales.

Los medidores de flujo másico de tipo mecánico alternativos son medidores de diafragma, medidores rotativos y medidores de turbina. Sin embargo, estos tipos de medidores son generalmente menos precisos e involucran piezas móviles que pueden estar sujetas a desgaste. Además, los medidores tales como los medidores rotativos solo son útiles para medir caudales relativamente bajos.

Una clase alternativa de medidores de flujo másicos son los medidores de flujo electrónicos. Dos tipos principales son medidores térmicos y medidores ultrasónicos. Los medidores de flujo térmico miden la transferencia de calor a través de una tubería calentada para medir el caudal. Los medidores de flujo ultrasónicos miden la velocidad del sonido en un medio gaseoso, a veces promediando la velocidad del sonido en múltiples rutas dentro de la tubería. Sin embargo, ambos tipos de medidor de flujo electrónico generalmente requieren un hardware de procesamiento de señales significativo y generalmente son artículos de elevado coste.

El documento EP-A-2 458 348 describe un medidor de flujo másico que utiliza un oscilador piezoeléctrico dispuesto aguas arriba de un orificio de flujo obstruido. El documento WO-A-2011/138147 se refiere a un procedimiento y aparato para determinar las características de flujo de un medio de flujo laminar. En una realización, se colocan dos osciladores piezoeléctricos a cada lado de una constricción de flujo y se calculan las diferentes densidades para determinar el

caudal másico.

Por lo tanto, las disposiciones conocidas padecen el problema técnico de que se requiere hardware complejo, voluminoso y costoso simplemente para medir el flujo másico, por no hablar de controlar el flujo másico.

Estos objetivos se logran mediante el procedimiento y los dispositivos de las reivindicaciones independientes.

- 5 Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un procedimiento para controlar automáticamente el caudal másico de un gas a través de un orificio a través del cual, en uso, se dispone que ocurra un flujo obstruido, utilizando el procedimiento un controlador que comprende una válvula electrónica situada aguas abajo de una fuente de gas, un oscilador piezoeléctrico en contacto con el gas aguas arriba del orificio y aguas abajo de la válvula electrónica, otro oscilador piezoeléctrico en contacto con el gas aguas abajo del orificio y un sensor de temperatura, en el que el oscilador piezoeléctrico tiene una frecuencia de resonancia que es proporcional a la densidad del gas aguas arriba del orificio, y en el que la densidad del gas aguas arriba del orificio es, en condiciones de flujo obstruido, proporcional al caudal másico a través del orificio, comprendiendo el procedimiento; a) impulsar el oscilador de cristal piezoeléctrico a una frecuencia de resonancia; b) impulsar el oscilador piezoeléctrico adicional a una frecuencia de resonancia; c) medir la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional; d) medir, utilizando el sensor de temperatura, la temperatura del gas; e) almacenar, en el controlador, un valor objetivo predeterminado de una función derivada de la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional y la temperatura y representativa de un caudal másico particular a través del orificio; y f) controlar la válvula electrónica por medio de un circuito de retroalimentación electrónica para minimizar la diferencia entre el valor objetivo y una función de la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico adicional y la temperatura medida del gas para mantener el caudal másico particular de gas a través de dicho orificio.

En una realización, la etapa f) comprende controlar la válvula electrónica en respuesta a una función inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura del gas. En una realización, la válvula electrónica comprende una válvula solenoide.

- 25 En una realización, la etapa e) comprende además: g) determinar, a partir de la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional, la densidad del gas aguas arriba del orificio y la densidad del gas aguas abajo del orificio. En una realización, la etapa e) comprende además: h) determinar la relación entre la densidad del gas aguas arriba del orificio y la densidad del gas aguas abajo del orificio.

- 30 Según un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un controlador para regular el caudal másico de un gas, estando configurado el controlador para controlar automáticamente el caudal másico de un gas a través de un orificio a través del cual, en uso, el flujo obstruido está dispuesto para que se produzca, comprendiendo el controlador una válvula electrónica ubicada aguas abajo de una fuente de gas, un oscilador piezoeléctrico en contacto con el gas aguas arriba del orificio y aguas abajo de la válvula electrónica, un oscilador piezoeléctrico adicional en contacto con el gas aguas abajo del orificio y un sensor de temperatura, en el que el oscilador piezoeléctrico tiene una frecuencia de resonancia que es proporcional a la densidad del gas aguas arriba del orificio, y en el que la densidad del gas aguas arriba del orificio es, en condiciones de flujo obstruido, proporcional al caudal másico a través del orificio, estando configurado el controlador para: impulsar el oscilador piezoeléctrico a una frecuencia de resonancia; impulsar el oscilador piezoeléctrico adicional a una frecuencia de resonancia; medir la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional; medir, utilizando el sensor de temperatura, la temperatura del gas; almacenar un valor objetivo predeterminado de una función derivada de dicha frecuencia de resonancia y temperatura y representativo de un caudal másico particular a través del orificio; y controlar la válvula electrónica por medio de un circuito de retroalimentación electrónica para minimizar la diferencia entre el valor objetivo y una función de la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico adicional y la temperatura medida del gas para mantener el caudal másico particular de gas a través de dicho orificio.

En una realización, el controlador está configurado además para controlar la válvula electrónica en respuesta a una función inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura del gas.

En una realización, la válvula electrónica comprende una válvula solenoide.

- 50 En una realización, el controlador está configurado además para determinar, a partir de la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional, la densidad del gas aguas arriba del orificio y la densidad del gas aguas abajo del orificio.

En una realización, el gas se dispensa desde un regulador de presión o una válvula ubicada aguas arriba del oscilador de cristal piezoeléctrico.

- 55 En una realización, el conjunto de sensor comprende un circuito de activación. En una variación, el conjunto de sensor comprende un circuito de activación que comprende un par Darlington dispuesto en una configuración de retroalimentación desde un amplificador de emisor común.

En una realización, el conjunto de sensor comprende una fuente de alimentación. En una disposición, la fuente de energía comprende una batería de iones de litio.

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

En una disposición, dicho oscilador de cristal piezoeléctrico comprende al menos dos púas planas.

5 En una realización, dicho oscilador de cristal piezoeléctrico tiene una frecuencia de resonancia de 32 kHz o mayor.

En una disposición, el medidor comprende además uno o más de un circuito de activación, un procesador y una fuente de energía.

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

10 En una realización, el cristal de cuarzo comprende al menos una púa. En una variación, el cristal de cuarzo comprende un par de púas planas.

En una realización, el cristal de cuarzo se corta en AT o SC.

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

15 En una realización, el conjunto de sensor comprende un circuito de activación. En una variación, el conjunto de sensor comprende un circuito de activación que comprende un par Darlington dispuesto en una configuración de retroalimentación desde un amplificador de emisor común.

En una realización, el conjunto de sensor comprende una fuente de energía. En una disposición, la fuente de energía comprende una batería de iones de litio.

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

20 En una disposición, el circuito de activación comprende un par Darlington dispuesto en una configuración de realimentación desde un amplificador emisor común.

En una disposición, el medidor está dispuesto aguas abajo de un regulador de presión o válvula.

En una disposición, dicho oscilador de cristal piezoeléctrico comprende al menos dos púas planas.

En una disposición, dicho oscilador de cristal piezoeléctrico tiene una frecuencia de resonancia de 32 kHz o mayor.

25 Según una tercera realización de la presente invención, se proporciona un producto de programa informático que comprende una o más porciones de software para hacer que el controlador descrito anteriormente ejecute las etapas del primer aspecto.

Según una cuarta realización de la presente invención, se proporciona un medio de almacenamiento utilizable por ordenador que tiene un producto de programa informático según el cuarto aspecto almacenado en el mismo.

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

30 La figura 1 es un diagrama esquemático de un cilindro de gas y un conjunto de regulador;

La figura 2 es un diagrama esquemático que muestra un conjunto regulador y un conjunto medidor según una primera realización de la invención;

La figura 3 muestra un gráfico de la frecuencia del cristal de cuarzo (kHz) en el eje Y en función de la densidad (kg/m³) para varios gases diferentes;

35 La figura 4 muestra un gráfico de la frecuencia del cristal de cuarzo (kHz) en el eje Y en función del caudal másico (en litros/min.) a través de un orificio;

La figura 5 muestra un gráfico del caudal en función de la densidad/presión para los valores medidos y para dos modelos predictivos;

40 La figura 6 muestra un gráfico del caudal en función de la densidad/presión para un modelo predicho y dos extremos de comportamiento operativo;

La figura 7 es un diagrama esquemático que muestra un conjunto regulador y un conjunto controlador según una segunda realización que no forma parte de la invención;

La figura 8 es un diagrama esquemático que muestra un conjunto de regulador y un conjunto de controlador según una tercera realización según la invención;

La figura 9 es un diagrama esquemático de un circuito de activación para su uso con cualquiera de las realizaciones primera a tercera;

La figura 10 es un diagrama esquemático que muestra una alternativa del circuito de activación para su uso con cualquiera de las realizaciones primera a tercera;

- 5 La figura 11 es un diagrama esquemático que muestra otra alternativa del circuito de activación para su uso con cualquiera de las realizaciones primera a tercera;

La figura 12 es un diagrama esquemático que muestra un circuito de activación del regulador para su uso con cualquiera de las realizaciones primera a tercera;

La figura 13 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento de funcionamiento de la primera realización;

- 10 La figura 14 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento de funcionamiento de la segunda o tercera realizaciones;

La figura 15 muestra un gráfico del comportamiento de frecuencia de diferentes tipos de cristales;

La figura 16 es un diagrama esquemático que muestra un conjunto de sensor alternativo que comprende dos cristales de cuarzo; y

- 15 La figura 17 muestra una disposición alternativa que utiliza una unidad de datos electrónica remota.

La figura 1 muestra una vista esquemática de un conjunto de cilindro de gas 10 según una realización de la invención. La figura 1 muestra una vista esquemática de una situación en la que se puede utilizar la presente invención. Se proporcionan un cilindro de gas 100, un regulador 150 y un conjunto de medidor 200.

- 20 El cilindro de gas 100 tiene un cuerpo de cilindro de gas 102 y una válvula 104. El cuerpo de cilindro de gas 102 comprende un recipiente de presión generalmente cilíndrico que tiene una base plana 102a dispuesta para permitir que el conjunto de cilindro de gas 10 se coloque sin apoyo sobre una superficie plana.

- 25 El cuerpo del cilindro de gas 102 está formado por acero, aluminio y/o material compuesto y está adaptado y dispuesto para soportar presiones internas de hasta aproximadamente 900 bares g. Una apertura 106 está ubicada en un extremo proximal del cuerpo 102 del cilindro de gas opuesto a la base 102a y comprende una rosca (no mostrada) adaptada para recibir la válvula 104.

- 30 El cilindro de gas 100 define un recipiente a presión que tiene un volumen interno V. Cualquier fluido adecuado puede estar contenido dentro del cilindro de gas 100. Sin embargo, la presente realización se refiere, pero no se limita exclusivamente a, gases permanentes purificados que están libres de impurezas tales como polvo y/o humedad. Ejemplos no exhaustivos de tales gases pueden ser: oxígeno, nitrógeno, argón, helio, hidrógeno, metano, trifluoruro de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, criptón, neón o mezclas de los mismos que se comportan a la manera de gases permanentes.

- 35 La válvula 104 comprende un alojamiento 108, una salida 110, un cuerpo de válvula 112 y un asiento de válvula 114. El alojamiento 108 comprende una rosca complementaria para acoplarse con la apertura 106 del cuerpo 102 del cilindro de gas. La salida 110 está adaptada y dispuesta para permitir que el cilindro de gas 100 se conecte a otros componentes en un conjunto de gas; por ejemplo, mangueras, tuberías u otras válvulas o reguladores de presión. La válvula 104 puede, opcionalmente, comprender una VIPR (válvula con reducción de presión integrada). En esta situación, se puede omitir el regulador 150.

- 40 El cuerpo de válvula 112 se puede ajustar axialmente hacia o alejándose del asiento de válvula 114 por medio de la rotación de un mango sujetable 116 selectivamente para abrir o cerrar la salida 110. En otras palabras, el movimiento del cuerpo de válvula 112 hacia o alejándose del asiento de válvula 112 controla selectivamente el área del conducto de comunicación entre el interior del cuerpo del cilindro de gas 102 y la salida 110. Esto, a su vez, controla el flujo de gas desde el interior del conjunto del cilindro de gas 100 al entorno externo.

- 45 Un regulador 150 está ubicado aguas abajo de la salida 110. El regulador 150 tiene una entrada 152 y una salida 154. La entrada 152 del regulador 150 está conectada a una tubería de entrada 156 que proporciona una vía de comunicación entre la salida 110 del cilindro de gas 100 y el regulador 150. La entrada 152 del regulador 150 está dispuesta para recibir gas a alta presión desde la salida 110 del cilindro de gas 100. Esta puede ser cualquier presión adecuada; sin embargo, generalmente, la presión del gas que sale de la salida 110 será superior a 20 bares y es más probable que esté en la región de 100 a 900 bares.

- 50 La salida 154 está conectada a una tubería de salida 158. Un acoplamiento 160 está situado en el extremo distal de la tubería de salida 158 y está adaptado para la conexión a otras tuberías o dispositivos (no mostrados) para los que se requiere el gas.

Un conjunto medidor 200 está ubicado en comunicación con la tubería de salida 158 entre la salida 154 y el

acoplamiento 160. El conjunto medidor 200 está ubicado inmediatamente aguas abajo del regulador 150 y está dispuesto para determinar el caudal másico del gas suministrado en la salida. 160.

El regulador 150 y el conjunto medidor 200 según una primera realización de la presente invención se muestran con mayor detalle en la figura 2.

- 5 En esta realización, el regulador 150 comprende un regulador de diafragma único. Sin embargo, el experto en la materia se dará cuenta fácilmente de las variaciones que podrían usarse con la presente invención; por ejemplo, un regulador de dos diafragmas u otra disposición.

10 El regulador 150 comprende una región de válvula 162 en comunicación con la entrada 152 y la salida 154. La región de válvula 162 comprende una válvula de resorte 164 ubicada junto a un asiento de válvula 166. La válvula de resorte 164 está conectada a un diafragma 168 que está configurado para permitir el movimiento de traslación de la válvula de resorte 164 hacia y desde el asiento de válvula 166 para cerrar y abrir respectivamente una apertura 170 entre ellos. El diafragma 168 está forzado elásticamente por un resorte 172 ubicado alrededor de un eje 174.

15 El regulador 150 se puede operar para recibir gas desde la salida 110 a la presión máxima del cilindro (por ejemplo, 100 bares), pero para suministrar gas a una baja presión fija sustancialmente constante (por ejemplo, 5 bares) a la salida 154. Esto se logra mediante un mecanismo de retroalimentación por lo que la presión del gas aguas abajo de la apertura 170 es operable para actuar sobre el diafragma 168 en oposición a la fuerza de carga del resorte 172.

20 Si la presión del gas en la región adyacente al diafragma 168 excede el nivel especificado, el diafragma 168 se puede hacer funcionar para moverse hacia arriba (con relación a la figura 2). Como resultado, la válvula de resorte 164 se acerca al asiento de la válvula 166, reduciendo el tamaño de la apertura 170 y, en consecuencia, restringiendo el flujo de gas desde la entrada 152 a la salida 154. En general, las fuerzas competitivas de la resistencia del resorte 172 y la presión del gas darán como resultado una posición de equilibrio del diafragma y, en consecuencia, el suministro de una presión constante de gas en la salida 154.

25 Se proporciona un mango sujetable 176 para permitir que un usuario ajuste la fuerza de carga del resorte 172, moviendo así la posición del diafragma 168 y, como resultado, ajustando el espacio de equilibrio entre la válvula de resorte 164 y el asiento de la válvula 166. Esto permite el ajuste de las dimensiones de la apertura 170 a través de la cual puede pasar el flujo de gas a alta presión desde la salida 110.

30 El conjunto medidor 200 comprende un cuerpo 202, un primer conjunto de sensor 204 y un segundo conjunto de sensor 206. El cuerpo 202 puede comprender cualquier material adecuado; por ejemplo, acero, aluminio o compuestos. El cuerpo 202 comprende un conducto 208, un primer alojamiento 210 y un segundo alojamiento 212. El conducto 208 está en comunicación con el interior de la tubería de salida 158 y está dispuesto para conectarse al mismo. El conducto 208 proporciona una vía de comunicación entre la salida 154 y el acoplamiento 160 (y, concomitantemente, los dispositivos o aplicaciones de usuario conectados al acoplamiento 160).

35 Una placa de orificio 214 está ubicada dentro del interior del conducto 208. La placa de orificio 214 comprende una pared que delimita un orificio restringido 216. La placa de orificio 214 forma una restricción de flujo dentro del conducto 208. El orificio 216 tiene un área de sección transversal A que es pequeña en relación con el área de la sección transversal del conducto 406 de manera que la velocidad del flujo a través del orificio 216 está en una condición obstruida, como se describirá más adelante.

40 Aunque la placa de orificio 214 se muestra como una placa de pared delgada en la figura 2, no es necesario que sea así. La placa de orificio 214 puede adoptar cualquier forma adecuada de pared y puede tener un perfil ahusado, o puede tener un espesor mayor que el mostrado. Alternativamente, puede usarse cualquier restricción de flujo adecuada en lugar de la placa de orificios 214. Por ejemplo, la restricción de flujo puede comprender una porción de una tubería de diámetro más estrecho que el resto de la misma. El experto en la técnica se dará cuenta fácilmente de las restricciones de flujo alternativas que pueden usarse para proporcionar un orificio 216 de restricción de flujo a través del cual, en uso, se produce un flujo obstruido.

45 En la presente realización, el conducto 208 tiene una longitud del orden de unos pocos centímetros. La placa de orificios 214 delimita un orificio 216 que tiene un diámetro en el intervalo de 0,1 mm a 4 mm. Esto es suficiente para proporcionar una condición de flujo obstruido y para suministrar un caudal de gas a través del orificio 216 de entre 11 y 40 litros/minuto para gases tales como nitrógeno o argón. Para un gas que tiene un peso molecular más bajo, el diámetro del orificio 216 se puede reducir para lograr un caudal similar. Alternativamente, para caudales mayores, el orificio 216 se puede escalar en consecuencia, siempre que la presión aguas arriba sea suficientemente más alta que la presión aguas abajo para crear condiciones de flujo obstruido a través del orificio 216.

55 La placa de orificio 214 divide el interior del conducto 208 en una sección aguas arriba 218 aguas arriba de la placa de orificios 214, y una sección 220 aguas abajo de la placa de orificios 214. En uso, cuando el gas fluye desde la salida 154 del regulador 150 en la parte aguas arriba 214 del conducto 208, la placa de orificios 214 actuará como una restricción de flujo, dando como resultado una diferencia de presión entre las porciones aguas arriba 218 y aguas abajo 220 del conducto 208. En consecuencia, la porción aguas arriba 218 del conducto 208 está a una primera presión P_1 y densidad ρ_1 y la porción aguas abajo 220 del conducto está a una segunda (y, en uso, necesariamente

más baja) presión P_2 y densidad ρ_2 . Esto se describirá en detalle más adelante.

El primer alojamiento 210 está ubicado adyacente a la porción aguas arriba 214 del conducto 208 y está dispuesto para contener al menos una parte del primer conjunto de sensor 204. El interior del primer alojamiento 210 puede estar a presión atmosférica o puede estar en comunicación con el interior del conducto 208 y, en consecuencia, a la misma presión que el interior de la tubería de salida 158. Esto eliminaría el requisito de un paso de presión entre el alojamiento 210 y el interior del conducto 208.

Alternativamente, el primer alojamiento 210 podría proporcionarse como parte del conducto 208. Por ejemplo, una parte del conducto 208 podría ensancharse para acomodar el conjunto de sensor 204.

El segundo alojamiento 212 está ubicado adyacente a la porción aguas abajo 214 del conducto 208 y está dispuesto para contener al menos una parte del segundo conjunto de sensor 206. El interior del segundo alojamiento 212 puede estar a presión atmosférica o puede estar en comunicación con el interior del conducto 208 y, en consecuencia, a la misma presión que el interior de la porción aguas abajo de la tubería de salida 160. Esto eliminaría el requisito de un paso de presión entre el segundo alojamiento 212 y el interior del conducto 208.

Alternativamente, en común con el primer alojamiento 210, el segundo alojamiento 212 podría omitirse y el segundo conjunto de sensor 206 ubicado en una parte del conducto 208 o el acoplamiento 160. Por ejemplo, la parte aguas abajo del conducto 208 podría ensancharse para acomodar el conjunto de sensor 206.

Estas disposiciones son practicables porque los inventores han descubierto que solo unos pocos componentes del primer y segundo conjuntos de sensores 204, 206 son sensibles a la alta presión. En particular, los componentes más grandes, tales como las baterías, pueden ser susceptibles a altas presiones. Sin embargo, se ha encontrado que las baterías de litio funcionan particularmente bien bajo las altas presiones encontradas dentro de las porciones aguas arriba y aguas abajo 218, 220 del conducto 208. Sin embargo, el experto en la materia podría contemplar fácilmente fuentes de energía alternativas adecuadas.

La ubicación potencial del primer y/o segundo conjunto de sensor 204, 206 completamente dentro del conducto 208 proporciona flexibilidad adicional al configurar el conjunto de medidor 200. En particular, la ubicación de componentes electrónicos relativamente frágiles completamente dentro de las paredes metálicas o compuestas del cuerpo 202 sin el requisito de una protuberancia tal como el alojamiento 210 proporciona una protección considerable contra daños ambientales o accidentales. Esto es particularmente importante, por ejemplo, en áreas de almacenamiento o depósitos, donde los cilindros de gas pueden estar ubicados junto a otros cilindros de gas, maquinaria pesada o superficies rugosas. El tamaño relativamente pequeño de los conjuntos de sensores 204, 206 permite que la ubicación interna se logre fácilmente.

Además, la ubicación interna del primer y/o segundo conjunto de sensor 204, 206 protege estos componentes de las condiciones ambientales tales como sal, agua y otros contaminantes. Esto permitiría, por ejemplo, utilizar un circuito de alta impedancia que es altamente sensible a los daños por sal y agua como parte del primer y/o segundo conjunto sensores 204, 206.

El conjunto medidor 200 está dispuesto para medir el caudal másico del gas que pasa a través del orificio 216. Este se mide utilizando el primer y segundo conjuntos sensores 204, 206 como se describe a continuación.

El caudal másico de gas a través del orificio 216 se puede determinar con precisión utilizando solo el primer conjunto de sensor 204 en condiciones particulares. La precisión de tal determinación depende de la existencia de una condición de flujo obstruido a través del orificio 216, como se describirá a continuación. Para muchas aplicaciones, quizás utilizando los parámetros estructurales del orificio 216 como se describió anteriormente, este será el caso en la mayoría de las condiciones operativas. Sin embargo, a caudales más bajos, esta condición puede no satisfacerse y la velocidad de flujo másico determinada por el primer conjunto de sensor 204 puede ser menos precisa.

Para mejorar la precisión de la determinación del flujo másico o para indicar su validez, se proporciona el segundo conjunto de sensor 206. El segundo conjunto de sensor 206 se puede operar para determinar la densidad aguas abajo para mejorar la precisión de la determinación del flujo másico y, adicional o alternatively, para determinar si se satisface la condición de flujo obstruido. Por lo tanto, el segundo conjunto de sensor 206 se puede operar para proporcionar, junto con el primer conjunto de sensor 204, confirmación de que el caudal másico determinado por el conjunto medidor 200 es exacto.

El primer conjunto de sensor 204 comprende un oscilador de cristal de cuarzo 222 conectado a un circuito de activación 224, un sensor de temperatura 226 y una batería 228.

En esta realización, el oscilador de cristal de cuarzo 222 y el sensor de temperatura 226 están ubicados en comunicación con el interior de la porción aguas arriba 218 del conducto 208, mientras que los componentes restantes del conjunto de sensor 204 están ubicados dentro del alojamiento 210. En otras palabras, el oscilador de cristal de cuarzo 222 está sumergido en el gas aguas arriba de la placa de orificios 214. También puede proporcionarse un microprocesador 238, ya sea por separado o como parte del circuito de activación 224.

El segundo conjunto de sensor 206 es sustancialmente similar al primer conjunto de sensor 204 aunque, en este caso, no se requiere un sensor de temperatura. El segundo conjunto de sensor 206 comprende un oscilador de cristal de cuarzo 230, un circuito de activación 232 y una batería 234. El segundo conjunto de sensor 206 está conectado al microprocesador 238.

5 En esta realización, el oscilador de cristal de cuarzo 230 está ubicado en comunicación con el interior de la porción aguas abajo 220 del conducto 208, mientras que los componentes restantes del conjunto de sensor 206 están ubicados dentro del alojamiento 212. En otras palabras, el oscilador de cristal de cuarzo 230 se sumerge en el gas aguas abajo de la placa de orificios 214.

10 El experto en la materia se dará cuenta fácilmente de las variaciones de la disposición descrita anteriormente. Por ejemplo, el segundo conjunto de sensor 206 puede comprender simplemente un oscilador de cristal de cuarzo conectado al circuito de activación 224 del primer conjunto de sensor 204. En otras palabras, el primer y segundo conjunto de sensor 204, 206 pueden compartir un circuito de activación común y/o batería y/o microprocesador.

15 Los circuitos de activación 224, 232 y los osciladores de cristal de cuarzo 222, 230 se describirán en detalle más adelante con referencia a las figuras 6 y 7. El sensor de temperatura 226 comprende un termistor. Se puede utilizar cualquier termistor adecuado. No se requiere alta precisión del termistor. Por ejemplo, una precisión de 0,5 °C es adecuada para esta realización. En consecuencia, se pueden utilizar componentes pequeños y baratos.

20 En esta disposición, los osciladores de cristal de cuarzo 222, 230 están constantemente bajo presión isostática dentro del conducto 208 y, en consecuencia, no experimentan un gradiente de presión. En otras palabras, cualquier esfuerzo mecánico originado por la diferencia de presión entre la atmósfera externa y el interior del cuerpo 202 del conjunto medidor 200 se expresa a través del cuerpo 202.

La teoría y el funcionamiento del conjunto de sensor 204 se describirán ahora con referencia a las figuras 3 y 4.

25 Cada uno de los osciladores de cristal de cuarzo 222, 230 tiene una frecuencia de resonancia que depende de la densidad del fluido en el que se encuentra. La exposición de un oscilador de cristal plano de tipo diapasón oscilante a un gas conduce a un cambio y amortiguación de la frecuencia de resonancia del cristal (en comparación con la frecuencia de resonancia del cristal en el vacío). Hay un número de razones para esto. Si bien existe un efecto amortiguador del gas sobre las oscilaciones del cristal, el gas adyacente a las púas vibratorias 222a, 230a (como se muestra en la figura 7) del respectivo oscilador de cristal del diapasón 222, 230 aumenta la masa efectiva del oscilador. Esto conduce a una reducción en la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo según el movimiento de un rayo elástico fijo de un solo lado:

30 1)
$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \frac{\rho}{M_0}}}$$

Donde f es la frecuencia de oscilación, f_0 es la frecuencia de oscilación en el vacío, ρ es la densidad del gas y M_0 es una constante.

La densidad ρ será en casi todos los casos pequeña en comparación con M_0 , de modo que la fórmula se pueda aproximar mediante la ecuación lineal:

35 2)
$$f = f_0 \left(1 - \frac{\rho}{2M_0}\right)$$

que puede reexpresarse en términos de la desviación de frecuencia Δf de f_0 como se establece en la ecuación 3):

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

40 En consecuencia, en una buena aproximación, el cambio de frecuencia es proporcional al cambio de densidad del gas al que está expuesto el oscilador de cristal de cuarzo. La figura 10 muestra, para varias mezclas de gases/gas diferentes, que la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 varía linealmente en función de la densidad.

45 En general, la sensibilidad del oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 es que se observa un cambio de frecuencia del 5 % con, por ejemplo, gas oxígeno (que tiene un peso molecular de 32 AMU) a 250 bares en comparación con la presión atmosférica. Tales presiones y densidades de gas son típicas de los cilindros de almacenamiento utilizados para gases permanentes, que normalmente están entre 137 y 450 bares g para la mayoría de los gases, y hasta 700 o 900 bares g para helio e hidrógeno.

El oscilador de cristal de cuarzo 222 es particularmente adecuado para su uso como sensor de densidad que forma parte de un medidor de flujo másico para gases suministrados comercialmente. Para detectar correctamente la

densidad de un gas, es necesario que el gas esté libre de polvo y gotitas de líquido, lo que está garantizado con gases suministrados comercialmente, pero no con aire o en la generalidad de situaciones de monitoreo de presión.

Una vez que se obtiene el valor de densidad del oscilador 222 de cristal de cuarzo, se puede determinar el caudal másico de gas a través del orificio 216. El caudal másico, Q , a través de un orificio se define como:

$$5 \quad 4) \quad Q = kv\rho_1 A$$

Dónde k es una constante, v es la velocidad del gas, ρ_1 es la densidad aguas arriba del gas y A es el área de la sección transversal del orificio A . Sin embargo, de la ecuación de Bernoulli 5):

$$5) \quad P_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2$$

10 A medida que disminuye el área de la sección transversal de un orificio, aumentará la velocidad del gas y se reducirá la presión del gas.

La determinación del caudal másico a través del orificio 216 usando solo un oscilador de cristal de cuarzo 222 aguas arriba depende de una condición conocida como flujo "obstruido" o "crítico". Tal situación surge cuando la velocidad del gas alcanza las condiciones sónicas, es decir, cuando la restricción de flujo causada por la placa de orificios 214 es tal que la velocidad del gas que fluye a través del orificio 216 alcanza la velocidad del sonido. Esto ocurre cuando 15 la relación de presión a través del orificio 216 (es decir, P_1/P_2) es aproximadamente 2 o más. Como medida alternativa, esta condición es generalmente aplicable cuando la presión absoluta aguas arriba P_1 es al menos 1 bar manométrico más alto que la presión absoluta aguas abajo P_2 , donde esa presión es atmosférica.

Una vez que se cumple esta condición, hay muy poco aumento adicional en la velocidad del aire a través del orificio 216. Por lo tanto, en la condición de flujo obstruido donde $v = C$ (la velocidad del sonido en el gas en cuestión), la ecuación 4) se convierte en:

$$6) \quad Q = kc\rho_1 A$$

En consecuencia, para un orificio que tiene un área A de sección transversal fija, el flujo másico a través del orificio 216 depende únicamente de la densidad aguas arriba. Este es el parámetro que el oscilador 222 de cristal de cuarzo está dispuesto para medir.

25 Además, la velocidad del sonido c es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta, $\sqrt{T}$. Sin embargo, como se describió anteriormente, en esta realización el sensor de temperatura 226 no necesita ser particularmente preciso. Por ejemplo, si el error de temperatura es de 0,5 K a 300 K, esto se traduce en un error de solo 1:1200 en la velocidad calculada del sonido. Por tanto, para muchas aplicaciones, el sensor de temperatura 226 no es necesariamente necesario.

30 La figura 4 ilustra los datos experimentales de la medición del caudal másico. La figura 4 es un gráfico de la frecuencia de resonancia (en kHz) en el eje Y en función del caudal de gas (en litros/minuto) en el eje X para el gas nitrógeno. Como se muestra, el gráfico es muy lineal y muestra que el caudal másico se puede medir con precisión utilizando el oscilador 222 de cristal de cuarzo.

35 Además, la alta precisión del oscilador de cristal de cuarzo 222 permite la medición con una precisión muy alta con una resolución de partes por millón. Junto con la respuesta lineal del sensor de densidad de cuarzo 222 a altas densidades y presiones, la alta precisión permite que el caudal másico de gases muy ligeros tales como H_2 y He se mida con precisión.

40 Sin embargo, como se describió anteriormente, la medición de flujo másico usando el oscilador de cristal de cuarzo 222 solo será precisa en condiciones de flujo obstruido, es decir, cuando la velocidad del flujo a través del orificio 216 sea cercana o igual a la velocidad del sonido en el gas. En la práctica, esto requerirá que el usuario mantenga un flujo de gas mínimo particular en el medidor 200 con el fin de proporcionar una medición precisa.

45 Como resultado, un solo oscilador de cristal de cuarzo 222 aguas arriba que opera solo no puede proporcionar una indicación de si existe una condición de flujo obstruido en el orificio 216. Por lo tanto, el segundo oscilador de cristal de cuarzo 230 (que forma al menos una parte del segundo conjunto de sensor 206). El uso de sensores piezoeléctricos tanto aguas arriba como aguas abajo del orificio 216 permite lograr una medición de flujo precisa.

Como se indicó anteriormente en relación con la ecuación 7), el caudal másico Q es proporcional a la densidad aguas arriba ρ_1 si la velocidad del flujo de fluido a través del orificio 216 es sónica o cercana a sónica. Como se indicó anteriormente, esta condición se cumple generalmente si la relación entre la presión aguas arriba y la presión aguas abajo (es decir, P_1/P_2) es aproximadamente 2 o mayor. Sin embargo, para

Sin embargo, en la práctica, la relación de presiones puede ser insuficiente. La aplicación de la ecuación de Bernoulli y la teoría establecida del flujo obstruido y la velocidad del sonido conduce a la ecuación 7)

$$7) \quad Q \approx k' A c \sqrt{(\rho_1^2 - \rho_1 \rho_2)}$$

5 Dónde k es una constante dimensional, A es el área del orificio, ρ_1 es la densidad aguas arriba y ρ_2 es la densidad aguas abajo.

Claramente, si $\rho_1/\rho_2 \geq 2$, entonces la ecuación 7) se puede aproximar mediante la ecuación 6) anterior porque se considera que existe una condición de flujo obstruido a través del orificio 216. Por lo tanto, en este caso, la medición del primer conjunto de sensor 204 se puede utilizar para proporcionar una indicación precisa del caudal másico en situaciones en las que $\rho_1/\rho_2 \geq 2$.

10 Sin embargo, si la relación es menor que ésta, entonces la ecuación 7) se puede utilizar para calcular el caudal másico usando el primer y el segundo conjunto de sensor 204, 206 para medir la densidad aguas arriba ρ_1 y la densidad aguas abajo ρ_2 respectivamente y para determinar el caudal másico a caudales a través del orificio 216 por debajo de las condiciones de flujo obstruido.

15 Alternativamente, el medidor 200 puede proporcionar simplemente una lectura del primer conjunto de sensor 204 (es decir, un caudal másico basado únicamente en una medición de la densidad aguas arriba) y el segundo conjunto de sensor 206 (incluido el oscilador de cristal de cuarzo 230) puede implementarse para proporcionar una indicación de que la medición del caudal másico está operando fuera de un régimen de operación preciso.

20 La figura 5 muestra datos experimentales (diamantes) que comprenden el caudal de gas helio en litros/min a través de un orificio de 0,5 mm. La línea recta muestra una relación lineal entre la densidad aguas arriba ρ_1 y el caudal para una relación de densidad aguas arriba/aguas abajo de más de 2:1 se ajusta a los datos (ecuación 6)). La curva muestra cómo se puede predecir con buena precisión el flujo en relaciones de densidad más bajas utilizando la ecuación 7), que tiene en cuenta la densidad aguas abajo ρ_2 . Esta curva se obtiene cambiando gradualmente de la ecuación 7) a la ecuación 6), en un intervalo de 1 bar g alrededor de la densidad en la relación crítica de 2:1 a medida que aumenta el caudal.

25 Por lo tanto, la provisión de un segundo conjunto de sensor tiene una ventaja cuando la salida del medidor está casi o completamente bloqueada. En este caso, el segundo sensor obligaría al medidor a adoptar la ecuación 7) (relación baja) e indicar correctamente flujo bajo o nulo. Sin el segundo sensor, el medidor indicaría erróneamente el flujo como si no se hubiera producido ningún bloqueo.

30 La figura 6 muestra la ventaja de precisión que proporciona teniendo en cuenta la densidad aguas abajo. La figura 6 muestra la línea de ajuste de la figura 5. Además, la curva superior muestra la relación que se predeciría a partir de un sensor aguas arriba solo si la densidad aguas abajo fuera atmosférica (esta línea se muestra en guiones cortos). La desviación del valor correcto es tan pequeña que se puede ignorar en flujos altos, pero es significativa en flujos bajos. La línea inferior (guiones largos) muestra la curva que se predeciría si la presión aguas abajo en relación con la atmósfera fuera el doble que en la medición experimental. De nuevo, la desviación es pequeña excepto en flujos bajos.

35 En la figura 7 se muestra una segunda realización que no forma parte de la invención. Las características de la segunda realización mostradas en la figura 7 que son comunes con la primera realización de la figura 2 tienen asignados los mismos números de referencia y no se describirán de nuevo aquí.

40 En la realización de la figura 7, el regulador 300 difiere del regulador 150 de la realización de la figura 2 en que el regulador 300 está dispuesto para proporcionar control automático de gas desde la salida 154 por medio de una válvula solenoide 302. Además, sólo se proporciona un conjunto de sensor único 204, en contraste con la primera realización. En otras palabras, el segundo conjunto de sensor se omite en esta realización. La válvula solenoide 302 comprende una armadura 304 que es movable en respuesta a una corriente eléctrica a través de las bobinas (no mostradas) de la válvula solenoide 302. La armadura 304 es movable para abrir o cerrar directamente la válvula de resorte 164 y, en consecuencia, la apertura. 170. La válvula solenoide 302 es, en esta realización, continuamente variable (conocida como "aproximadamente proporcional") para regular el flujo de gas a través del regulador 300.

45 La válvula solenoide 302 mostrada en la figura 5 está en la condición normalmente abierta. En otras palabras, en ausencia de una corriente eléctrica a través de la válvula solenoide 302, la armadura 304 está en una posición extendida de manera que la válvula de resorte 164 está abierta, es decir, la apertura 170 está abierta. Si se aplica una corriente a la válvula solenoide 302, la armadura 304 se retraerá y la válvula de resorte 164 se cerrará.

50 El experto en la materia conocerá fácilmente variaciones alternativas de la válvula solenoide que podrían usarse con la presente invención. Por ejemplo, la válvula solenoide puede ser digital en respuesta (es decir, encendida/apagada o abierta/cerrada). También se pueden implementar estructuras alternativas; por ejemplo, la armadura 304 puede actuar directamente sobre el diafragma, o puede controlar el flujo a través de un conducto estrecho en comunicación con la salida 154 para regular el movimiento del diafragma 168. Alternativamente, la válvula de asiento podría eliminarse y el diafragma 168 en sí podría ser el miembro de válvula que controla directamente el flujo de gas desde la entrada 152 a la salida 154.

La segunda realización comprende un controlador 350. A los componentes del controlador 350 en común con el conjunto medidor 200 se les asignan los mismos números de referencia para mayor claridad.

El controlador 350, en la realización de la figura 7, comprende solamente un único conjunto de sensor 204 situado aguas arriba del orificio 216 y se omite el segundo conjunto de sensor de la primera realización.

- 5 El controlador 350 comprende además un accionamiento de solenoide electrónico 352 conectado a la válvula solenoide 302 y al conjunto de sensor 204. El accionamiento de solenoide 352 está dispuesto para recibir una señal del conjunto de sensor 204 y para controlar la válvula solenoide 302 en respuesta a esa señal y, en consecuencia, controlar el flujo a través del regulador 300.

- 10 El accionamiento de solenoide 352 puede comprender cualquier circuito de accionamiento adecuado para controlar la válvula solenoide 302. Un circuito adecuado puede ser una disposición de amplificador operacional que tiene una entrada desde el conjunto de sensor 204 al terminal negativo del amplificador operacional. En consecuencia, al terminal positivo se le podría conectar una resistencia variable diseñada para proporcionar un nivel de referencia constante y actuar como comparador.

- 15 Una entrada del conjunto de sensor 204 al accionamiento de solenoide 352 provocará el funcionamiento de la válvula solenoide 302. Por ejemplo, si la señal de entrada del conjunto de sensor 204 (o, alternativamente, el procesador 240) excede un nivel de umbral particular, el accionamiento de solenoide 352 puede energizar la válvula solenoide 302. Esto se describirá en detalle a continuación. La válvula solenoide 302 puede controlarse de manera digital (es decir, encendida o apagada) en la que se varía un voltaje de CC entre un valor máximo y un valor mínimo. Esto se conoce como modulación por ancho de pulso (PWM). Alternativamente, el voltaje de CC del accionamiento de solenoide 352 puede ser continuamente variable (por ejemplo, proporcional) para ajustar la posición de la válvula de resorte 164 con precisión de manera analógica.

- 20 Adicional o alternativamente, la activación de solenoide 352 puede controlar la válvula solenoide 302 por medio de una salida de CC que comprende un componente de CA. Dado que la extensión de la armadura 304 desde la válvula solenoide 302 es aproximadamente proporcional a la corriente aplicada, esto hace que la armadura 304 de la válvula solenoide 302 oscile. Tales oscilaciones mitigan la "adherencia" inducida a la armadura 304, es decir, ayudan a evitar que la armadura 304 se atasque o se atore.

- 25 Alternativamente, se pueden usar otras disposiciones de control, tales como FET, microprocesadores o ASIC, según corresponda, para controlar el funcionamiento de la válvula solenoide 302. Además, como se ha discutido, la válvula solenoide 302 puede funcionar en modo digital (es decir, encendido/apagado) o modos analógicos (es decir, continuamente variables) para permitir un movimiento preciso de la válvula de resorte 164 o similar.

- 30 Ahora se describirá el funcionamiento del controlador 350. Como se describió anteriormente, el conjunto de sensor 204 (incluido el oscilador de cristal de cuarzo 222) puede usarse como parte de un circuito de retroalimentación para controlar la presión electrónicamente.

- 35 La salida del conjunto de sensor 204 está conectada a la válvula solenoide 302 en un circuito de retroalimentación. Como se demostró anteriormente, la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 es proporcional a la densidad del gas aguas arriba del orificio 216, y que, en condiciones de flujo obstruido, la densidad del gas aguas arriba del orificio 216 es proporcional al caudal másico Q a través de el orificio.

- 40 Por lo tanto, una frecuencia de resonancia particular del oscilador de cristal de cuarzo 222 corresponderá a una densidad particular de gas aguas arriba del orificio y, en condiciones de flujo obstruido, un caudal másico particular a través del orificio 216. En consecuencia, se puede implementar un circuito de retroalimentación en el controlador 350 que es operable para mantener la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 a una frecuencia determinada particular y, concomitantemente, mantiene el flujo de gas a través del orificio 216 a un caudal másico constante.

- 45 El principio general de funcionamiento es por tanto: el oscilador de cristal de cuarzo 222 está ajustado a una frecuencia particular. Si la densidad aguas arriba descende, entonces aumentará la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222. El controlador 350 abrirá entonces la válvula solenoide 302 para aumentar la presión de gas aguas abajo de la válvula solenoide 302. Esto aumentará la presión y, concomitantemente, la densidad del gas aguas arriba del orificio 216. Esto disminuirá entonces la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 hasta que se restablezca la frecuencia del punto de ajuste, que corresponde a un caudal másico de gas deseado a través del orificio 216. En otras palabras, el controlador 350 implementa un circuito de retroalimentación para minimizar la diferencia entre el caudal másico del punto de ajuste y el caudal másico real.

- 50 El controlador 350 controla también la válvula solenoide 302 dependiendo de la temperatura. Allí, el circuito de retroalimentación está dispuesto para mantener la presión no igual a una constante, sino igual a una constante dividida por la raíz cuadrada de la temperatura absoluta, $1/\sqrt{T}$, medida en Kelvin.

- 55 El controlador de presión de gas electrónico fabricado de esta manera se puede conectar a un orificio aguas abajo que ofrecerá un flujo másico de gas constante. La relación de presión (aguas arriba/aguas abajo) a través del orificio debe ser suficiente, alrededor de 2 o más, para mantener el orificio en un flujo crítico, por lo que obtenemos que en el

punto más estrecho el flujo de gas tiene una velocidad aproximadamente sónica. Esto se puede ver en la ecuación 7).

En la ecuación 6), la velocidad del sonido en el gas, c se puede expresar como se establece en la ecuación 8):

$$8) \quad c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

5 donde γ es la relación de calores específicos C_p/C_v , R es la constante del gas, T es la temperatura y M es el peso molecular. Por lo tanto, al sustituir la expresión de c en la ecuación 6) se obtiene:

$$9) \quad Q = kA\rho_1 \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

donde ρ_1 es la densidad aguas arriba medida por el oscilador de cristal de cuarzo 222.

En general, solo la densidad y la temperatura son variables en las aplicaciones relevantes para la presente invención. Por tanto, una cantidad ρ' puede definirse como se establece en la ecuación 10):

$$10) \quad \rho' = \frac{\rho_1}{\sqrt{T}}$$

La sustitución de esta expresión en la ecuación 9) proporciona:

$$11) \quad Q = kA\rho' \sqrt{\frac{\gamma R}{M}}$$

15 Por tanto, dado que $\sqrt{\frac{\gamma R}{M}}$ es una constante para gases envasados, k es una constante para cualquier gas en particular y el área A del orificio es una constante, el flujo másico se puede determinar a partir de ρ' . En consecuencia, el flujo másico se puede controlar basándose en la densidad dividida por la raíz cuadrada de la temperatura o, en la práctica, la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 dividida por la raíz cuadrada de la temperatura medida por el sensor de temperatura 226.

20 Por lo tanto, si el conjunto de sensor 204 se puede operar para controlar la válvula solenoide 302 para mantener ρ' sustancialmente constante, el caudal másico a través del orificio 216 se mantendrá constante. En otras palabras, la válvula solenoide 302 puede controlarse basándose tanto en la frecuencia de resonancia medida del oscilador de cristal de cuarzo 222 como en la temperatura medida.

La primera o la segunda realizaciones pueden comprender adicionalmente una pantalla (no mostrada) para mostrar al usuario los resultados de las mediciones realizadas en el gas detectado. Alternativamente, la pantalla puede ubicarse alejada de los conjuntos de medidor 200, 350 y los datos relevantes pueden comunicarse de manera remota.

25 Para que el oscilador de cristal de cuarzo 222 proporcione una medición precisa, el oscilador de cristal de cuarzo 222 debe mantenerse libre de suciedad, humedad y otras contaminaciones. Si bien esto no es un problema para los gases envasados suministrados comercialmente (que son extremadamente limpios), el controlador 350 se puede utilizar en situaciones en las que la contaminación ambiental puede ser un problema importante.

30 En consecuencia, el conjunto medidor 200, 350 está provisto de un filtro 354 ubicado entre el oscilador de cristal de cuarzo 222 y el flujo principal de gas. El filtro 354 puede tener cualquier tamaño de poro adecuado. Los tamaños de los poros están en el intervalo de 5 a 10 μm y son particularmente adecuados para esta aplicación. El filtro 354 (o un filtro similar) se puede aplicar a la primera realización descrita anteriormente.

35 Alternativamente, el filtro 354 puede omitirse si el oscilador de cristal de cuarzo 222 está ubicado detrás de una apertura que sea lo suficientemente pequeña para evitar la entrada de suciedad u otros contaminantes. Por ejemplo, un tamaño de apertura de 0,25 mm sería adecuado para su uso sin filtro, siempre que se pueda medir de esta manera la presión total aguas arriba del gas.

En la figura 8 se muestra una tercera realización según la presente invención. La tercera realización comprende un controlador 450. A los componentes del controlador 450 en común con el conjunto medidor 200 y el controlador 350 se asignan los mismos números de referencia para mayor claridad.

40 El controlador 450, en la realización de la figura 8, comprende solamente un primer conjunto de sensor 204 situado aguas arriba del orificio 216 y un segundo conjunto de sensor 206 en común con la primera realización. Por tanto, la tercera realización es una combinación de las características de la primera y la segunda realización.

El controlador 450 comprende además una activación de solenoide electrónico 452 conectado a la válvula solenoide 402 y a los conjuntos de sensores 204, 206. La activación de solenoide 452 está dispuesto para recibir una señal de los conjuntos de sensores 204, 206 y para controlar la válvula solenoide 402 en respuesta a esa señal y, en consecuencia, controlar el flujo a través del regulador 400.

5 La activación de solenoide 452 puede tomar la forma de activación de solenoide 352 y cualquier variación del mismo y no se describirá más aquí. Una entrada de los conjuntos de sensores 204, 206 a la activación de solenoide 452 provocará el funcionamiento de la válvula solenoide 402. Por ejemplo, si la señal de entrada del conjunto de sensor 204 (o, alternativamente, el procesador 240) excede un nivel de umbral particular, la activación de solenoide 352 puede energizar la válvula de solenoide 302. Esto se describirá en detalle a continuación. La válvula solenoide 302
10 puede controlarse de manera digital (es decir, encendida o apagada) en la que se varía un voltaje de CC entre un valor máximo y un valor mínimo. Alternativamente, el voltaje de CC de la activación de solenoide 352 puede ser continuamente variable (por ejemplo, proporcional) para ajustar la posición de la válvula de resorte 164 con precisión de manera analógica.

15 Adicional o alternativamente, la activación de solenoide 452 puede controlar la válvula de solenoide 302 por medio de una salida de CC que comprende un componente de CA. Dado que la extensión de la armadura 304 desde la válvula solenoide 302 es aproximadamente proporcional a la corriente aplicada, esto hace que la armadura 304 de la válvula solenoide 302 oscile. Tales oscilaciones mitigan la "fricción" de la armadura 304, es decir, ayudan a evitar que la armadura 304 se atasque o se atore.

20 Alternativamente, se pueden usar otras disposiciones de control, tales como FET, microprocesadores o ASIC, según corresponda, para controlar el funcionamiento de la válvula solenoide 302. Además, como se ha discutido, la válvula solenoide 302 puede funcionar en modo digital (es decir, encendido/apagado) o modos analógicos (es decir, continuamente variables) para permitir un movimiento preciso de la válvula de resorte 164 o similar.

Ahora se describirá el funcionamiento del controlador 450. Como se describió anteriormente, el conjunto de sensor 204 (que incluye el oscilador de cristal de cuarzo 222) y el conjunto de sensor 206 (que incluye el oscilador de cristal de cuarzo 230) se pueden usar como parte de un circuito de retroalimentación para controlar la presión electrónicamente.
25

La salida del primer conjunto de sensor 204 y el segundo conjunto de sensor 206 está conectada a la válvula solenoide 302 en un circuito de retroalimentación. Como se demostró anteriormente, la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 es proporcional a la densidad del gas aguas arriba del orificio 216, y que, en condiciones de flujo obstruido, la densidad del gas aguas arriba del orificio 216 es proporcional al caudal másico Q a través del orificio.

30 Por lo tanto, una frecuencia de resonancia particular del oscilador de cristal de cuarzo 222 corresponderá a una densidad particular de gas aguas arriba del orificio y, en condiciones de flujo obstruido, un caudal másico particular a través del orificio 216. En consecuencia, se puede implementar un circuito de retroalimentación en el controlador 450 que es operable para mantener la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 a una frecuencia determinada particular y, concomitantemente, mantiene el flujo de gas a través del orificio 216 a un caudal másico constante.

35 El controlador 350 controla también la válvula solenoide 302 dependiendo de la temperatura. Allí, el circuito de retroalimentación está dispuesto para mantener la presión no igual a una constante, sino igual a una constante dividida por la raíz cuadrada de la temperatura, $1/\sqrt{T}$.

40 El controlador de presión de gas electrónico fabricado de esta manera se puede conectar a un orificio aguas abajo que ofrecerá un flujo másico de gas constante. La relación de presión (aguas arriba/aguas abajo) a través del orificio debe ser suficiente, alrededor de 2 o más, para mantener el orificio en un flujo crítico, por lo que obtenemos que en el punto más estrecho el flujo de gas tiene una velocidad aproximadamente sónica. Esto se puede ver en la ecuación 6).

En la ecuación 8) anterior, se expresa la velocidad del sonido en el gas, c. Por lo tanto, al sustituir la expresión por c en la ecuación 7) se obtiene la ecuación:

$$12) \quad Q \approx k' A \sqrt{(\rho_1^2 - \rho_1 \rho_2)} \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

45 donde ρ_1 es la densidad aguas arriba medida por el oscilador de cristal de cuarzo 222, y ρ_2 es la densidad aguas abajo medida por el oscilador de cristal de cuarzo 230.

En general, como se ha expuesto anteriormente, solo las densidades aguas arriba y aguas abajo y la temperatura son variables en las aplicaciones relevantes para la presente invención. Por lo tanto, como para la segunda realización, se puede definir una cantidad ρ'' como se establece en la ecuación 13):

$$13) \quad \rho'' = \sqrt{\frac{(\rho_1^2 - \rho_1 \rho_2)}{T}}$$

50

La sustitución de esta expresión en la ecuación 9) proporciona:

$$14) \quad Q = kAp'' \sqrt{\frac{\gamma R}{M}}$$

Por tanto, dado que $\sqrt{\frac{\gamma R}{M}}$ es una constante para gases envasados, k es una constante y el área A del orificio es una constante, el flujo másico se puede determinar únicamente a partir de p'' . Por lo tanto, los conjuntos de sensores 204 y 206 son operables para controlar la válvula solenoide 402 para mantener p'' sustancialmente constante. En otras palabras, la válvula solenoide 302 se puede controlar basándose en la frecuencia de resonancia del primer oscilador de cristal de cuarzo 222, la frecuencia de resonancia del segundo oscilador de cristal de cuarzo 230 y la raíz cuadrada de la temperatura medida por el sensor de temperatura 226.

La primera, segunda o tercera realizaciones pueden comprender adicionalmente una pantalla (no mostrada) para mostrar al usuario los resultados de las mediciones realizadas en el gas detectado. Alternativamente, la pantalla puede ubicarse alejada del conjunto medidor 200 y los controladores 350, 450 y los datos relevantes pueden comunicarse de manera remota.

Por ejemplo, la primera, segunda o tercera realizaciones pueden comprender además una antena (no mostrada) para la comunicación remota con, por ejemplo, una estación base. Esto se discutirá más adelante. En este caso, la antena puede ubicarse fuera del cuerpo 202 y conectarse al conjunto de sensor 204 por medio de un cable o conector equivalente.

La propia antena puede adaptarse y disponerse para utilizar cualquier protocolo de comunicación adecuado; por ejemplo, una lista no exhaustiva puede ser RFID, Bluetooth, infrarrojos (IR), transmisión inalámbrica 802.11, modulación de frecuencia (FM) o una red celular.

Alternativamente, se puede implementar la comunicación de un solo cable. La comunicación de un solo cable necesita solo un conductor metálico para comunicarse: la ruta de "retorno" del circuito se proporciona mediante un acoplamiento capacitivo a través del aire entre los dispositivos de comunicación. El experto en la materia conocerá fácilmente las alternativas de la antena (y el hardware de transmisión asociado) que podrían usarse con las realizaciones discutidas en esta memoria.

Por ejemplo, la comunicación puede realizarse mediante transmisión acústica desde el interior del alojamiento 210. Un transmisor situado dentro del alojamiento 210 puede efectuar la transmisión acústica. El transmisor puede comprender, por ejemplo, un resonador piezoeléctrico de frecuencia fija simple.

También se requiere un receptor complementario y este componente puede ubicarse alejado del conjunto de medidor 200 o controlador 350, 450 y puede comprender hardware tal como, por ejemplo, un detector de tono de bucle de bloqueo de fase integrado con un micrófono.

El conjunto de sensor 204 se describirá ahora con más detalle con referencia a las figuras 9, 10 y 11. Si bien la siguiente descripción se refiere al conjunto de sensor 204, debe entenderse que esto también se aplica al conjunto de sensor 206 que puede ser estructuralmente y electrónicamente similar en configuración.

El oscilador de cristal de cuarzo 222 comprende una sección plana de cuarzo cortado. El cuarzo muestra un comportamiento piezoeléctrico, es decir, la aplicación de un voltaje a través del cristal hace que el cristal cambie de forma, generando una fuerza mecánica. Por el contrario, una fuerza mecánica aplicada al cristal produce una carga eléctrica.

Dos superficies paralelas del oscilador 222 de cristal de cuarzo están metalizadas para proporcionar conexiones eléctricas a través del cristal a granel. Cuando se aplica un voltaje a través del cristal por medio de los contactos de metal, el cristal cambia de forma. Mediante la aplicación de un voltaje alterno al cristal, se puede hacer que el cristal oscile.

El tamaño físico y el espesor del cristal de cuarzo determinan la característica o frecuencia de resonancia del cristal de cuarzo. De hecho, la característica o frecuencia de resonancia del cristal 222 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 lo tanto, la estructura del oscilador de cristal de cuarzo 222 no se describirá más aquí.

Además, la frecuencia de vibración resonante de un cristal de cuarzo variará según el entorno en el que se encuentre el cristal. En el vacío, el cristal tendrá una frecuencia particular. Sin embargo, esta frecuencia cambiará en diferentes entornos. Por ejemplo, en un fluido, la vibración del cristal será amortiguada por las moléculas circundantes y esto afectará a la frecuencia de resonancia y la energía requerida para hacer oscilar el cristal a una amplitud dada.

Además, la adsorción de gas o la deposición de materiales circundantes sobre el cristal afectará a la masa del cristal vibrante, alterando la frecuencia de resonancia. Tal adsorción o deposición de material forma la base de los analizadores selectivos de gases de uso común en los que se forma una capa absorbente sobre el cristal y aumenta de masa a medida que se absorbe el gas.

Sin embargo, en el presente caso, no se aplica recubrimiento al oscilador de cristal de cuarzo 222. De hecho, la deposición de material sobre el oscilador de cristal de cuarzo 222 no es deseable en el presente caso ya que la precisión de la medición puede verse afectada.

5 Como se muestra en la figura 9, el oscilador de cristal de cuarzo 222 de la presente realización tiene forma de diapason y comprende un par de púas 222a de aproximadamente 5 mm de largo dispuestos para oscilar a una frecuencia de resonancia de 32,768 kHz. Las púas 222a se forman en la sección plana de cuarzo. Las púas 222a de la horquilla oscilan normalmente en su modo fundamental, en el que se mueven sincrónicamente acercándose y alejándose entre sí a la frecuencia de resonancia.

10 El cuarzo fundido (o no cristalino) tiene un coeficiente de expansión dependiente de la temperatura muy bajo y un coeficiente de elasticidad bajo. Esto reduce la dependencia de la frecuencia fundamental de la temperatura y, como se mostrará, los efectos de la temperatura son mínimos.

15 Además, es conveniente utilizar cuarzo de corte AT o corte SC. En otras palabras, la sección plana de cuarzo se corta en ángulos particulares, de modo que el coeficiente de temperatura de la frecuencia de oscilación se puede disponer para que sea parabólico con un pico ancho alrededor de la temperatura ambiente. Por lo tanto, el oscilador de cristal puede disponerse de manera que la pendiente en la parte superior del pico sea exactamente cero.

Tales cristales de cuarzo están comúnmente disponibles a un coste relativamente bajo. A diferencia de la mayoría de los osciladores de cristal de cuarzo que se utilizan *al vacío*, en la presente realización, el oscilador de cristal de cuarzo 222 está expuesto al gas a presión en el conducto 208.

20 El circuito de activación 224 para activar el oscilador de cristal de cuarzo 222 se muestra en la figura 9. El circuito de activación 224 debe cumplir una serie de criterios específicos. En primer lugar, el oscilador de cristal de cuarzo 222 de la presente invención puede exponerse a un intervalo de presiones de gas; potencialmente, las presiones pueden variar desde la presión atmosférica (cuando el cilindro de gas 100 está vacío) hasta alrededor de 900 bares g si el cilindro de gas contiene un gas presurizado tal como hidrógeno. Por tanto, se requiere que el oscilador de cristal de cuarzo 222 funcione (y se reinicie después de un período de inactividad) bajo un amplio intervalo de presiones.

25 En consecuencia, el factor de calidad (Q) del oscilador de cristal de cuarzo 222 variará considerablemente durante el uso. El factor Q es un parámetro adimensional relacionado con la tasa de amortiguación de un oscilador o resonador. De manera equivalente, puede caracterizar el ancho de banda de un resonador en relación con su frecuencia central.

30 En general, cuanto mayor es el factor Q de un oscilador, menor es la tasa de pérdida de energía en relación con la energía almacenada del oscilador. En otras palabras, las oscilaciones de un oscilador de factor Q alto se reducen en amplitud más lentamente en ausencia de una fuerza externa. Los resonadores impulsados sinusoidalmente que tienen factores Q más altos resuenan con mayores amplitudes en la frecuencia de resonancia, pero tienen un ancho de banda más pequeño de frecuencias alrededor de la frecuencia para la que resuenan.

35 El circuito de activación 224 debe poder activar el oscilador de cristal de cuarzo 222 a pesar del factor Q cambiante. A medida que aumenta la presión en el cilindro de gas 100, la oscilación del oscilador de cristal de cuarzo 222 se amortiguará cada vez más y el factor Q disminuirá. El factor Q descendente requiere que un amplificador en el circuito de activación 224 proporcione una ganancia mayor. Sin embargo, si se proporciona una amplificación demasiado alta, el circuito de activación 224, la respuesta del oscilador de cristal de cuarzo 222 puede resultar difícil de distinguir. En este caso, el circuito de activación 224 puede simplemente oscilar a una frecuencia no relacionada, o a la frecuencia de un modo no fundamental del oscilador de cristal de cuarzo 222.

40 Como limitación adicional, el circuito de activación 224 debe ser de baja potencia para funcionar con pequeñas baterías de baja potencia durante mucho tiempo con o sin energía suplementaria, tal como las células fotovoltaicas.

45 El circuito de activación 224 se describirá ahora con referencia a la figura 9. Para activar el oscilador de cristal de cuarzo 222, el circuito de activación 224 esencialmente toma una señal de voltaje del oscilador de cristal de cuarzo 222, la amplifica y la envía de vuelta al oscilador de cristal de cuarzo 222. La frecuencia de resonancia fundamental del oscilador de cristal de cuarzo 222 es, en esencia, una función de la tasa de expansión y contracción del cuarzo. Esto está determinado en general por el corte y tamaño del cristal.

50 Sin embargo, los factores externos afectan también a la frecuencia de resonancia. Cuando la energía de las frecuencias de salida generadas coincide con las pérdidas en el circuito, se puede mantener una oscilación. El circuito de activación 224 está dispuesto para detectar y mantener esta frecuencia de oscilación. Entonces, la frecuencia puede medirse mediante el microprocesador 238, utilizado para calcular la propiedad apropiada del gas requerida por el usuario y, si es necesario, emitirla a un medio de visualización adecuado (como se describirá más adelante).

El circuito de activación 224 está alimentado por una batería 228 de 6 V. La batería 228, en esta realización, comprende una batería de litio. Sin embargo, las fuentes de energía alternativas resultarán evidentes para el experto en la materia; por ejemplo, otros tipos de baterías tanto recargables como no recargables y una disposición de células solares.

55 El circuito de activación 224 comprende además un amplificador de emisor común de par Darlington 250. Un par

Darlington comprende una estructura compuesta que consta de dos transistores NPN bipolares configurados de manera que la corriente amplificada por uno primero de los transistores se amplifica aún más por el segundo. Esta configuración permite obtener una ganancia de corriente más alta en comparación con cada transistor que se toma por separado. Se pueden utilizar transistores bipolares PNP alternativos.

- 5 El par Darlington 250 está dispuesto en una configuración de retroalimentación de un solo amplificador de emisor común transistor (T_1) 252. En la figura 7 se muestra un transistor de unión bipolar NPN. Sin embargo, el experto en la materia conocerá las disposiciones de transistores alternativos que pueden utilizarse; por ejemplo, un transistor PNP de unión bipolar o transistores de efecto de campo semiconductor de óxido metálico (MOSFET).

- 10 El circuito de activación 224 comprende otro transistor seguidor de emisor NPN T_2 que actúa como un amplificador de búfer 254. El amplificador de búfer 230 está dispuesto para funcionar como un búfer entre el circuito y el entorno externo. Sin embargo, esta función es opcional y puede que no sea necesaria; por ejemplo, un FET podría conectarse directamente para impulsar el circuito 220.

- 15 Un condensador 256 está ubicado en serie con el oscilador de cristal de cuarzo 222. El condensador 232, en este ejemplo, tiene un valor de 100 pF y permite que el circuito de activación 224 active el oscilador de cristal de cuarzo 222 en situaciones en las que el cristal se ha contaminado, por ejemplo por sales u otros materiales depositados.

Además, el circuito de activación 224 puede optimizarse para un arranque rápido del oscilador de cristal de cuarzo 222. Para lograr esto, se puede conectar una resistencia adicional y un condensador adicional entre la base del transistor D_1 y tierra. Estos componentes pueden comprender, por ejemplo, una resistencia de 10 M Ω y un condensador de 10 nF.

- 20 Ahora se describirá un circuito de activación 240 alternativo con referencia a la figura 10. El circuito de activación 240 puede usarse en lugar del circuito de activación 204 descrito anteriormente. En contraste con el circuito de activación 204 descrito anteriormente, el circuito de activación 240 incluye un amplificador de transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico de drenaje común (MOSFET) 242 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 del amplificador coincida con la alta impedancia del oscilador de cristal de cuarzo 202. En otras palabras, el MOSFET 242 proporciona una ganancia unitaria con una alta impedancia de entrada para reducir la carga eléctrica en el oscilador de cristal de cuarzo 202.

- 30 La salida del amplificador MOSFET de drenaje común 242 se alimenta a dos amplificadores emisores comunes 244 de un solo transistor (Q_2 , Q_3) sucesivos. Los resistores R_6 y R_8 proporcionan tanto retroalimentación negativa como corriente de polarización para los transistores. Los amplificadores emisores comunes 244 proporcionan una alta ganancia para amplificar las oscilaciones del oscilador de cristal de cuarzo 202 y, en esta realización, comprenden transistores de unión bipolar NPN. Sin embargo, el experto en la materia conocerá las disposiciones de transistores alternativas que pueden utilizarse; por ejemplo, un transistor PNP de unión bipolar o MOSFET.

- 35 Un condensador 246 está conectado entre el oscilador de cristal de cuarzo 202 y tierra. El condensador 246, en esta realización, se puede operar para aumentar la activación del oscilador de cristal de cuarzo 202.

Un resistor 248 está conectado en serie con el oscilador de cristal de cuarzo 202. El resistor 248, en esta realización, tiene un valor de 56 k Ω y amortigua las oscilaciones del oscilador de cristal de cuarzo 202 para permitir que el circuito oscile en un amplio intervalo de presiones con cambios graduales en la forma de onda.

- 40 El circuito de activación 240 está alimentado por una batería de 3 V 249. La batería 249, en esta realización, comprende una batería de litio. Sin embargo, las fuentes de energía alternativas resultarán evidentes para el experto en la materia; por ejemplo, otros tipos de baterías tanto recargables como no recargables y una disposición de células solares. Alternativamente, se puede utilizar una disposición de suministro de red después de la rectificación de CC y la reducción de voltaje adecuada.

- 45 Ahora se describirá un circuito de activación alternativo 260 con referencia a la figura 11. El circuito de activación mostrado en la figura 8 está configurado de manera similar a un oscilador Pierce. Los osciladores Pierce son conocidos por los osciladores de reloj de IC digitales. En esencia, el circuito de control 260 comprende un solo inversor digital (en forma de transistor) T , tres resistencias R_1 , R_2 y R_S , dos condensadores C_1 , C_2 y el oscilador de cristal de cuarzo 222 (u oscilador 230).

- 50 En esta disposición, el oscilador de cristal de cuarzo 222 funciona como un elemento de filtro altamente selectivo. El resistor R_1 actúa como un resistor de carga para el transistor T . El resistor R_2 actúa como un resistor de retroalimentación, polarizando el inversor T en su región lineal de operación. Esto permite efectivamente que el inversor T funcione como un amplificador inversor de alta ganancia. Otro resistor R_S se utiliza entre la salida del inversor T y el oscilador de cristal de cuarzo 222 para limitar la ganancia y amortiguar las oscilaciones no deseadas en el circuito.

- 55 El oscilador de cristal de cuarzo 222, en combinación con C_1 y C_2 forma un filtro de paso de banda de red Pi. Esto permite un desplazamiento de fase de 180 grados y una ganancia de voltaje desde la salida hasta la entrada

aproximadamente a la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222. El circuito de activación 260 descrito anteriormente es fiable y económico de fabricar ya que comprende relativamente pocos componentes. Este circuito también es particularmente aplicable a aplicaciones de baja presión.

5 Como se discutió anteriormente, el conjunto de sensor 204 puede incluir un microprocesador 238 que recibe entradas del oscilador de cristal de cuarzo 222 y el circuito de activación 224. El microprocesador 238 puede comprender una disposición adecuada, tal como un ASIC o FPGA. El microprocesador 238 está programado para calcular y, si es necesario, mostrar y comunicar una determinación del caudal másico del gas a través del orificio 216.

10 Cuando se usa con el oscilador de cristal de cuarzo 222, el microprocesador 238 puede configurarse para medir la frecuencia f o período de la señal del circuito de activación 224. Esto puede lograrse, por ejemplo, contando las oscilaciones durante un tiempo fijo y convirtiendo esa frecuencia en un valor de densidad usando un algoritmo o una tabla de consulta. Este valor se pasa al microprocesador 238.

El microprocesador 238 recibe también la temperatura medida T desde el sensor de temperatura 226. El microprocesador 238 está dispuesto para realizar, basándose en las entradas suministradas, un cálculo para determinar el caudal másico del gas a través del orificio 216.

15 Una vez que se ha determinado el caudal másico, estos datos pueden almacenarse en una memoria local, pueden mostrarse en una pantalla de visualización o pueden transmitirse a una estación remota.

El microprocesador 238 puede, opcionalmente, diseñarse para que la producción en masa sea idéntica en todo el conjunto de medidor 200, con diferentes características en el software y hardware habilitadas para diferentes gases.

20 Además, el microprocesador 238 puede configurarse también para minimizar el consumo de energía mediante la implementación de modos de espera o "suspensión" que pueden cubrir el microprocesador 238 y componentes adicionales tales como el circuito de activación 224 y el oscilador de cristal de cuarzo 222.

25 Se pueden implementar varios esquemas; por ejemplo, el microprocesador 238 puede estar en espera durante 10 segundos de cada 11 segundos. Además, el microprocesador 238 puede controlar el oscilador de cristal de cuarzo 222 y el circuito de activación 224 de manera que estos componentes se pongan en espera durante la mayor parte del tiempo, activando solo los componentes que consumen más energía durante $\frac{1}{2}$ segundo cada 30 segundos.

30 La figura 12 muestra un circuito de activación del regulador 270 adecuado para su uso con la segunda o tercera realizaciones. El circuito de activación del regulador 270 es operable para recibir una frecuencia de entrada del oscilador de cristal de cuarzo 222 (y/o el oscilador de cristal de cuarzo 230 en el caso de la tercera realización) en una puerta NAND cuádruple. La puerta NAND recibe también una frecuencia de punto de ajuste de un oscilador conectado a un regulador de voltaje. La puerta cuádruple NAND funciona como una puerta XOR.

35 La diferencia entre estas frecuencias se introduce a continuación en un convertidor de frecuencia-voltaje para convertir esto en una salida de voltaje. La salida de voltaje es amplificada a continuación por un amplificador 741 y se utiliza para controlar la posición de la válvula solenoide 302 con el fin de mantener la entrada de frecuencia del(de los) oscilador(es) de cristal de cuarzo 222, 230 a la frecuencia de punto de ajuste establecida por el voltaje en el potenciómetro de 10K que se muestra en la figura 12.

Ahora se describirá un procedimiento de funcionamiento de la primera realización de la presente invención con referencia a la figura 13. El procedimiento descrito a continuación es aplicable a la primera realización únicamente.

Etapa 500: inicializar la medición

40 En la etapa 500, se inicializa la medición del caudal másico de gas a través del orificio 216. Esto puede ser activado, por ejemplo, por un usuario pulsando un botón en el exterior del alojamiento 210. Alternativamente, la medición puede iniciarse por medio de una conexión remota, por ejemplo, una señal transmitida a través de una red inalámbrica y recibida por el medidor 200 a través de una antena.

Como alternativa o adición adicional, el conjunto medidor 200 puede configurarse para inicializarse de forma remota o con un temporizador. El procedimiento pasa a la etapa 502.

Etapa 502: activa los osciladores de cristal de cuarzo

50 Una vez inicializados, los circuitos de activación 224, 232 se utilizan para activar los respectivos osciladores de cristal de cuarzo 222, 230. Durante la inicialización, cada circuito de activación 224, 232 aplica un voltaje de CA de ruido aleatorio a través del respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230. Al menos una parte de ese voltaje aleatorio estará a una frecuencia adecuada para hacer oscilar el respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230. Cada oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 comenzará a oscilar en sincronía con esa señal respectiva.

Como se apreciará, los osciladores de cristal de cuarzo 222, 230 son, en esencia, detectores y controladores autónomos, ya que la frecuencia de resonancia de cada cristal es en sí misma lo que se está midiendo.

Por medio del efecto piezoeléctrico, el movimiento de los osciladores de cristal de cuarzo 222, 230 generará entonces un voltaje en la banda de frecuencia de resonancia del respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230. El circuito de activación respectivo 224, 232 amplifica entonces la señal generada por el oscilador de cristal de cuarzo 222, 230, de modo que las señales generadas en la banda de frecuencia del resonador de cristal de cuarzo 222, 230 dominan la salida del circuito de activación 224, 232. La estrecha banda de resonancia del cristal de cuarzo filtra todas las frecuencias no deseadas y el circuito de activación 224, 230 activa a continuación el respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 a la frecuencia de resonancia fundamental f . Una vez que el oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 respectivo se ha estabilizado a una frecuencia de resonancia particular, el procedimiento pasa a la etapa 504.

Etapa 504: mide la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo

La frecuencia de resonancia f depende de las condiciones ambientales dentro de la porción aguas arriba 214 del conducto 208. En la presente realización, el cambio en la frecuencia de resonancia Δf es, en una buena aproximación, proporcional en magnitud al cambio de densidad del gas en la porción aguas arriba 214 del conducto 208 y disminuirá al aumentar la densidad.

Para realizar una medición, se mide la frecuencia del oscilador de cristal de cuarzo 222 durante un período de aproximadamente 1 s. Esto es para permitir que la lectura se estabilice y para que se cuenten suficientes oscilaciones para determinar una medición precisa. La medición de frecuencia se lleva a cabo en el microprocesador 238. El microprocesador 238 puede registrar también el tiempo, T_1 , cuando se inició la medición.

Una vez que se ha medido la frecuencia, el procedimiento pasa a la etapa 506.

Etapa 506: medir la temperatura del gas

En la etapa 506, el sensor de temperatura 226 mide la temperatura del gas dentro de la porción aguas arriba 214 del conducto 208. Esta medición es necesaria para determinar con precisión la velocidad del sonido en el flujo de gas.

Como se describió anteriormente, la medición de temperatura no necesita ser particularmente precisa. Por ejemplo, si el sensor de temperatura 226 tiene una precisión de 0,5 °C, esto corresponde a un error de solo aproximadamente una parte entre mil doscientos en el valor de temperatura absoluta requerido para el cálculo de la velocidad del sonido.

Como alternativa, esta etapa puede implicar simplemente introducir un valor de temperatura fijo en el microprocesador 238. Esto puede ocurrir, por ejemplo, en situaciones en las que se utiliza un entorno de temperatura conocida o donde no se requiere un alto grado de precisión. En este caso, no se requiere el sensor de temperatura 226.

Etapa 508: determinar el flujo másico de gas

Esto se hace usando la ecuación 8) arriba donde la densidad ρ_1 del gas aguas arriba del orificio 216, la densidad ρ_2 del gas aguas abajo del orificio 216 y, opcionalmente, se conoce la temperatura T del gas. Por lo tanto, conociendo las frecuencias de resonancia medidas en la etapa 504, la temperatura conocida (opcional) T del gas medida en la etapa 406, se puede realizar una medición precisa del caudal másico a través del orificio 216. Esto se aplica incluso si no se cumple la condición de flujo obstruido (establecida en la ecuación 7)) porque se pueden utilizar las densidades tanto aguas arriba como aguas abajo. A continuación, el procedimiento pasa a la etapa 510.

Alternativamente, la medición del flujo másico se puede realizar usando la ecuación 7) para condiciones de flujo obstruido donde la densidad ρ_1 del gas aguas arriba del orificio 216 y, opcionalmente, se conoce la temperatura T del gas. Por lo tanto, conociendo la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 medida en la etapa 504, la temperatura conocida (opcional) T del gas medida en la etapa 406, se puede realizar una medición del caudal másico Q a través del orificio 216. Además, la medición de la densidad ρ_2 del gas aguas abajo del orificio 216 por el oscilador de cristal de cuarzo 230 puede utilizarse también para proporcionar una indicación de la precisión de la medición realizada por el oscilador de cristal de cuarzo 222. El procedimiento pasa entonces a la etapa 510.

Etapa 510: comunicar y almacenar resultados

El caudal másico del gas se puede mostrar de varias formas. Por ejemplo, una pantalla (no mostrada) unida al alojamiento 210, cuerpo 202 o regulador 150, 300 podría mostrar el caudal másico del gas a través del orificio 216 (y como consecuencia, el caudal másico de gas que sale del acoplamiento 160). Como alternativa, la medición del caudal másico podría comunicarse de forma remota a una estación base o a un medidor ubicado en un accesorio adyacente, como se describirá más adelante.

Como alternativa adicional, el caudal másico de gas en el tiempo T_1 podría almacenarse en una memoria local de dicho microprocesador 238 para generar un registro de tiempo.

Como se estableció anteriormente, en la realización alternativa, se puede mostrar un mensaje de advertencia al usuario para indicar que el caudal másico medido puede ser inexacto porque el caudal es demasiado bajo para que exista una condición de flujo obstruido a través del orificio 216.

A continuación, el procedimiento pasa a la etapa 512.

Etapas 512: conjunto del sensor de apagado

No es necesario mantener operativo el conjunto medidor 200 en todo momento. Por el contrario, es beneficioso reducir el consumo de energía apagando el conjunto medidor 200, 350 cuando no esté en uso. Esto prolonga la vida útil de la batería 228.

- 5 La configuración del circuito de activación 224 permite que el oscilador de cristal de cuarzo 222 se reinicie independientemente de la presión en la porción aguas arriba 214 del conducto 208. Por lo tanto, el conjunto medidor 200, 350 se puede apagar cuando sea necesario para ahorrar energía de la batería.

Se describirá ahora un procedimiento de funcionamiento de la segunda y tercera realizaciones con referencia a la figura 14. El procedimiento descrito a continuación es aplicable a la segunda y tercera realizaciones solamente.

10 ***Etapas 600: inicializar la medición***

En la etapa 600, se inicializa la medición del caudal másico de gas a través del orificio 216. Esto puede ser activado, por ejemplo, por un usuario pulsando un botón en el exterior del alojamiento 210. Alternativamente, la medición puede iniciarse por medio de una conexión remota, por ejemplo, una señal transmitida a través de una red inalámbrica y recibida por el controlador 350, 450 a través de una antena.

- 15 En este punto, el usuario introduce un caudal másico de gas deseado en particular. Esto es almacenado a continuación por el controlador 350, 450 y el circuito de activación del regulador 270 adecuadamente programado para alcanzar una frecuencia de punto de ajuste especificada del oscilador de cristal de cuarzo 222 (y el oscilador de cristal de cuarzo 230 en el caso de la tercera realización) y oscilador de cristal de cuarzo 222 a esa frecuencia particular para mantener un flujo de gas particular.
- 20 Como alternativa o adición adicional, los controladores 350, 450 pueden configurarse para inicializarse de forma remota o con un temporizador. El procedimiento pasa a la etapa 602.

Etapas 602: activar los osciladores de cristal de cuarzo

- 25 Una vez inicializado, el circuito de activación 224 se utiliza para activar el oscilador de cristal de cuarzo 222. En el caso de la segunda realización, el circuito de activación 232 se utiliza también para activar el oscilador de cristal de cuarzo 230. Durante la inicialización, el o cada circuito de activación 224, 232 aplica un voltaje de CA de ruido aleatorio a través del respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230. Al menos una parte de ese voltaje aleatorio estará a una frecuencia adecuada para hacer que el respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 oscile. Cada oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 comenzará a oscilar en sincronía con esa señal respectiva.

- 30 Como se apreciará, los osciladores de cristal de cuarzo 222, 230 son, en esencia, detectores y controladores autónomos, ya que la frecuencia de resonancia de cada cristal es en sí misma lo que se está midiendo.

- Por medio del efecto piezoeléctrico, el movimiento de los osciladores de cristal de cuarzo 222, 230 generará entonces un voltaje en la banda de frecuencia de resonancia del respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230. El, o el respectivo circuito de activación 224, 232 amplifica entonces la señal generada por el oscilador de cristal de cuarzo 222, 230, de modo que las señales generadas en la banda de frecuencia del resonador de cristal de cuarzo 222, 230 dominan la salida del circuito de activación 224, 232. La estrecha banda de resonancia del cristal de cuarzo filtra todos las frecuencias no deseadas y el circuito de activación 224, 230 activa a continuación el respectivo oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 a la frecuencia de resonancia fundamental f . Una vez que el oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 respectivo se ha estabilizado a una frecuencia de resonancia particular, el procedimiento pasa a la etapa 604.
- 35

Etapas 604: medir la frecuencia de resonancia de los osciladores de cristal de cuarzo

- 40 La frecuencia de resonancia f depende de las condiciones ambientales dentro de la porción aguas arriba 214 del conducto 208. En la presente realización, el cambio en la frecuencia de resonancia Δf es, en una buena aproximación, proporcional en magnitud al cambio de densidad del gas en la porción aguas arriba 218 del conducto 208 (para el oscilador de cristal de cuarzo 222) y disminuirá al aumentar la densidad. Lo mismo se aplica al oscilador de cristal de cuarzo 230 en el caso de la tercera realización.
- 45 Para realizar una medición, se mide la frecuencia del o de cada oscilador de cristal de cuarzo 222, 230 durante un período de aproximadamente 1 s. Esto es para permitir que la lectura se estabilice y para que se cuenten suficientes oscilaciones para determinar una medición precisa. La medición de frecuencia se lleva a cabo en el microprocesador 238. El microprocesador 238 puede registrar también el tiempo, T_1 , cuando se inició la medición.

Una vez que se ha medido la frecuencia, el procedimiento pasa a la etapa 606.

50 ***Etapas 606: medir la temperatura del gas***

En la etapa 606, el sensor de temperatura 226 mide la temperatura del gas dentro de la porción aguas arriba 218 del conducto 208. Esta medición es necesaria para determinar con precisión la velocidad del sonido en el flujo de gas.

Etapas 608: mantener el circuito de retroalimentación

El controlador 350, 450 se puede operar para mantener un circuito de retroalimentación de acuerdo con la ecuación 11) anterior; es decir, utilizando la frecuencia de oscilación del oscilador de cristal de cuarzo 222 (o la ecuación 13) si se utiliza la tercera realización incluyendo el oscilador 230 si se desea) para lograr un caudal másico particular.

- 5 En otras palabras, la relación de la densidad ρ_1 del gas aguas arriba del orificio 216 dividido por la raíz cuadrada de la temperatura T (en la segunda realización), o una función de la densidad ρ_1 del gas aguas arriba del orificio 216 y la densidad ρ_2 del gas aguas abajo del orificio 216 dividido por la raíz cuadrada de la temperatura T (en la tercera realización) se usa para permitir que se genere un flujo de gas proporcional.

- 10 Por lo tanto, la frecuencia de resonancia del oscilador de cristal de cuarzo 222 (o una función tanto del oscilador 222 como del oscilador 230 en la tercera realización) dividida por la raíz cuadrada de una señal proporcional a la temperatura se puede mantener en un valor predeterminado mediante apertura/cierre proporcional de la válvula solenoide 302 para mantener un flujo de gas constante a través del orificio 216.

Etapas 610: comunicar y almacenar resultados

- 15 Un usuario puede especificar un caudal másico particular del gas. Por lo tanto, siempre que se cumpla esta condición, no se requiere más visualización. Sin embargo, opcionalmente, el caudal másico real del gas se puede mostrar de varias formas. Por ejemplo, una pantalla (no mostrada) unida al alojamiento 210, cuerpo 202 o regulador 150, 300 podría mostrar el caudal másico del gas a través del orificio 216 (y como consecuencia, el caudal másico de gas que sale del acoplamiento 160). Como alternativa, la medición del caudal másico podría comunicarse de forma remota a una estación base o a un medidor ubicado en un accesorio adyacente, como se describirá más adelante.

- 20 Como alternativa adicional, el caudal másico de gas en el tiempo T_1 podría almacenarse en una memoria local de dicho microprocesador 238 para generar un registro de tiempo.

Como se estableció anteriormente, en la realización alternativa, se puede mostrar un mensaje de advertencia al usuario para indicar que el caudal másico medido puede ser inexacto porque el caudal es demasiado bajo para que exista una condición de flujo obstruido a través del orificio 216.

- 25 Las variaciones de las realizaciones anteriores resultarán evidentes para el experto en la materia. La configuración precisa de los componentes de hardware y software puede diferir y aún estar dentro del alcance de la presente invención. El experto en la materia conocerá fácilmente las configuraciones alternativas que podrían utilizarse.

- 30 Por ejemplo, las realizaciones descritas anteriormente han utilizado un oscilador de cristal de cuarzo que tiene una frecuencia fundamental de 32,768 kHz. Sin embargo, se pueden usar cristales que operan a frecuencias alternativas. Por ejemplo, los osciladores de cristal de cuarzo que funcionan a 60 kHz y 100 kHz pueden usarse con las realizaciones descritas anteriormente. En la figura 15 se muestra un gráfico que muestra el cambio de 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.

- 35 La operación de frecuencia más alta permite monitorear la presión con mayor frecuencia porque se requiere un período de tiempo más corto para muestrear un número dado de ciclos. Además, los cristales de frecuencia más alta permiten utilizar un ciclo de trabajo más pequeño en un modo de "suspensión" de un cristal. A modo de explicación, en la mayoría de los casos, el cristal y el circuito de control pasarán la mayor parte del tiempo apagados, y solo se encenderán durante un segundo más o menos cuando se necesite una medición. Esto puede ocurrir, por ejemplo, una vez por minuto. Cuando se usa un cristal de frecuencia más alta, la presión se puede medir más rápido. Por tanto, se puede reducir el tiempo en el que el cristal está operativo. Esto puede reducir el consumo de energía y, concomitantemente, mejorar la duración de la batería.

- 40 Además, las realizaciones anteriores se han descrito midiendo la frecuencia absoluta de un oscilador de cristal de cuarzo. Sin embargo, en la electrónica autónoma incorporada en un regulador asociado a un cilindro de gas, puede resultar ventajoso medir el cambio de frecuencia del sensor comparando esa frecuencia con un cristal de referencia de tipo idéntico pero contenido en un paquete de vacío o presión. El paquete a presión puede contener gas a una densidad seleccionada, gas en condiciones atmosféricas o puede estar abierto a la atmósfera externa al cilindro de gas.

- 45 Un conjunto de sensor 700 adecuado se muestra en la figura 16. El conjunto de sensor 700 comprende un primer oscilador de cristal de cuarzo 702 y un segundo oscilador de cristal de cuarzo 704. El primer oscilador de cristal de cuarzo 702 es un cristal de referencia que se encuentra dentro de un recipiente sellado 706 al vacío. El primer oscilador de cristal de cuarzo 702 es impulsado por un circuito de activación 708.

El segundo oscilador de cristal de cuarzo 704 es un cristal similar al cristal 222 descrito en las realizaciones anteriores. El segundo oscilador de cristal de cuarzo 704 está expuesto al entorno de gas dentro del alojamiento 210. El segundo oscilador de cristal de cuarzo 704 es activado por un circuito de activación 710.

Esta comparación se puede realizar usando un circuito mezclador electrónico 712 que combina las dos señales de

frecuencia y produce una salida a una frecuencia igual a la diferencia entre los dos cristales. Esta disposición permite negar pequeños cambios debidos, por ejemplo, a la temperatura.

Además, el conjunto de circuitos utilizados en el conjunto de sensor 204 se puede simplificar porque solo se requiere medir la frecuencia de diferencia. Además, este enfoque es particularmente adecuado para su uso con un oscilador de cristal de alta frecuencia (MHz), donde puede ser difícil medir la frecuencia del cristal directamente.

Además, no es necesario montar en el cilindro de gas toda la electrónica necesaria para medir y mostrar la densidad, masa o flujo másico. Por ejemplo, las funciones electrónicas podrían dividirse entre unidades montadas en el cilindro de forma permanente y unidades montadas en la estación de uso del cliente o montadas temporalmente en la salida del cilindro, como la posición que se usa normalmente para un medidor de flujo convencional.

Un ejemplo de esta disposición se muestra con referencia a la figura 17. La disposición comprende un conjunto de cilindro de gas 80 que comprende un cilindro de gas 800, un regulador 802 y un medidor de caudal másico 804. El cilindro de gas 800, regulador 802 y medidor de caudal másico 804 son sustancialmente similares al cilindro de gas 100, el regulador 150 y el conjunto medidor 200 o el controlador 350, 450 sustancialmente como se describió previamente con referencia a realizaciones previas.

En esta realización, el medidor de caudal másico 804 comprende un oscilador de cristal de cuarzo y un circuito de activación (no mostrado) similar al oscilador de cristal de cuarzo 222 y el circuito de activación 224 de realizaciones anteriores. Se proporciona una antena 806 para la comunicación a través de cualquier protocolo de comunicación remota adecuado; por ejemplo, Bluetooth, infrarrojos (IR) o RFID. Alternativamente, se puede utilizar la comunicación de un solo cable.

Como alternativa adicional, se pueden utilizar procedimientos de comunicación acústica. La ventaja de tales procedimientos es que la comunicación remota puede realizarse sin el requisito de una antena externa.

Una tubería de conexión 808 está conectada a la salida del cilindro de gas 800. La tubería de conexión está terminada por una conexión de conexión rápida 810. La conexión de conexión rápida 810 permite conectar y desconectar la tubería de conexión o los componentes del cilindro de gas de manera fácil y rápida 800.

Se proporciona una unidad de conexión rápida 850 para la conexión al cilindro de gas 800. Se proporciona un conector de conexión rápida complementario 812 para la conexión al conector 808. Además, la unidad de conexión rápida 850 está provista de una unidad de datos 852. La unidad de datos 852 comprende una pantalla 854 y una antena 856 para comunicarse con la antena 804 del conjunto de cilindro de gas 80. La pantalla 854 puede comprender, por ejemplo, una pantalla LCD, LED o legible a la luz del día para minimizar el consumo de energía y maximizar la visibilidad de la pantalla.

La unidad de datos 852 puede registrar varios parámetros medidos por el conjunto de sensor 802 del conjunto de cilindro de gas 80. Por ejemplo, la unidad de datos 852 podría registrar el caudal másico frente al tiempo. Un registro de este tipo podría ser útil, por ejemplo, para los contratistas de soldadura que deseen verificar que el flujo de gas esté presente y sea correcto durante largos procedimientos de soldadura con gas en componentes críticos, o para proporcionar datos de la empresa sobre el uso de un cliente en particular.

Alternativamente, los datos de la unidad de datos 850 pueden enviarse a una máquina de soldar habilitada por ordenador (para aplicaciones de soldadura) u otro equipo que use gas, para permitir el cálculo de parámetros derivados, junto con mensajes de advertencia.

Además, la unidad 850 de datos puede disponerse para proporcionar las siguientes funciones: proporcionar una alarma audible o visible si cambia el tipo de gas; contener y mostrar datos sobre el uso de gas; para proporcionar funcionamiento multimodo, por ejemplo, un modo de proveedor/llenado y un modo de cliente; para permitir la entrada de datos; para proporcionar datos tales como un número de cilindro, el tipo de gas, un certificado de análisis, un historial del cliente (quién tenía el cilindro y en qué fechas), datos de seguridad y consejos operativos se pueden llevar en forma resumida en el cilindro.

Como alternativa, todos los ejemplos anteriores pueden, opcionalmente, procesarse, almacenarse u obtenerse de un sistema ubicado completamente en (o dentro) del cilindro de gas 800 o del alojamiento 210 como se discutió en términos del conjunto de medidor 200 o controladores 350, 450.

Aunque las realizaciones anteriores se han descrito con referencia al uso de un oscilador de cristal de cuarzo, el experto en la materia conocerá fácilmente materiales piezoeléctricos alternativos que también podrían usarse. Por ejemplo, una lista no exhaustiva puede incluir osciladores de cristal que comprenden: tantalato de litio, niobato de litio, borato de litio, berlinita, arseniuro de galio, tetraborato de litio, fosfato de aluminio, óxido de bismuto germanio, cerámica de titanato de circonio policristalino, cerámica de alto contenido de alúmina, compuesto de óxido de zinc-silicio o tartrato de dipotasio.

Se han descrito realizaciones de la presente invención con particular referencia a los ejemplos ilustrados. Aunque se muestran ejemplos específicos en los dibujos y se describen en esta memoria en detalle, debe entenderse, sin embargo, que los dibujos y la descripción detallada no pretenden limitar la invención a la forma particular descrita. Se

apreciará que se pueden realizar variaciones y modificaciones a los ejemplos descritos dentro del alcance de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para controlar automáticamente el caudal másico de un gas a través de un orificio (216) a través del cual, en uso, se dispone que ocurra un flujo obstruido, utilizando el procedimiento un controlador (350; 450) que comprende una válvula electrónica (302) ubicada aguas abajo de una fuente de gas, un oscilador piezoeléctrico (222) en contacto con el gas aguas arriba del orificio y aguas abajo de la válvula electrónica, otro oscilador piezoeléctrico (230) en contacto con el gas aguas abajo del orificio y un sensor de temperatura (226), donde el oscilador piezoeléctrico tiene una frecuencia de resonancia que es proporcional a la densidad del gas aguas arriba del orificio, y donde la densidad del gas aguas arriba del orificio es, en condiciones de flujo obstruido, proporcional al caudal másico a través del orificio, comprendiendo el procedimiento;
5
- a) activar el oscilador piezoeléctrico a una frecuencia de resonancia;
10
- b) activar el oscilador piezoeléctrico adicional a una frecuencia de resonancia;
c) medir la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional;
d) medir, utilizando el sensor de temperatura, la temperatura del gas;
15
- e) almacenar, en el controlador, un valor objetivo predeterminado de una función derivada de la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional y la temperatura y representativa de un caudal másico particular a través del orificio; y
f) controlar la válvula electrónica por medio de un circuito de retroalimentación electrónica para minimizar la diferencia entre el valor objetivo y una función de la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico adicional y la temperatura medida del gas con el fin de mantener el caudal másico particular de gas a través de dicho orificio.
20
2. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que la etapa f) comprende controlar la válvula electrónica en respuesta a una función inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta del gas.
3. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la válvula electrónica comprende una válvula solenoide.
25
4. Un procedimiento según la reivindicación 1, 2 o 3, en el que la etapa f) comprende además:
g) determinar, a partir de la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional, la densidad del gas aguas arriba del orificio y la densidad del gas aguas abajo del orificio.
30
5. Un procedimiento según la reivindicación 4, en el que la etapa f) comprende además:
h) determinar la relación entre la densidad del gas aguas arriba del orificio y la densidad del gas aguas abajo del orificio.
35
6. Un controlador (350; 450) para regular el caudal másico de un gas, estando configurado el controlador para controlar automáticamente el caudal másico de un gas a través de un orificio (216) a través del cual, en uso, se dispone que se produzca un flujo obstruido, comprendiendo el controlador una válvula electrónica (302) ubicada aguas abajo de una fuente de gas, un oscilador piezoeléctrico (222) en contacto con el gas aguas arriba del orificio y aguas abajo de la válvula electrónica, un oscilador piezoeléctrico adicional en contacto con el gas aguas abajo del orificio, y un sensor de temperatura (226), en el que el oscilador piezoeléctrico tiene una frecuencia de resonancia que es proporcional a la densidad del gas aguas arriba del orificio, y donde la densidad del gas aguas arriba del orificio es, en condiciones de flujo obstruido, proporcional al caudal másico a través del orificio, estando el controlador configurado para:
40
- activar el oscilador piezoeléctrico a una frecuencia de resonancia; activar el oscilador piezoeléctrico adicional a una frecuencia de resonancia; medir la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional; medir, utilizando el sensor de temperatura, la temperatura del gas; almacenar un valor objetivo predeterminado de una función derivada de la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional y la temperatura y representativa de un caudal másico particular a través del orificio; y controlar la válvula electrónica por medio de un circuito de retroalimentación electrónica para minimizar la diferencia entre el valor objetivo y una función de la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia medida del oscilador piezoeléctrico adicional y la temperatura medida del gas para mantener el caudal másico particular de gas a través de dicho orificio.
45
7. Un controlador según la reivindicación 6, configurado además para controlar la válvula electrónica en respuesta a una función inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta del gas.
50

8. Un controlador según una cualquiera de las reivindicaciones 6 o 7, en el que la válvula electrónica comprende una válvula solenoide.

9. Un controlador según la reivindicación 6, 7 u 8, en el que el controlador está configurado además para determinar, a partir de la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico y la frecuencia de resonancia del oscilador piezoeléctrico adicional, la densidad del gas aguas arriba del orificio y la densidad del gas aguas abajo del orificio.

10. Un producto de programa informático que comprende una o más partes de software para hacer que el controlador de la reivindicación 6 ejecute las etapas de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

11. Un medio de almacenamiento utilizable por ordenador que tiene un producto de programa informático según la reivindicación 10 almacenado en él.

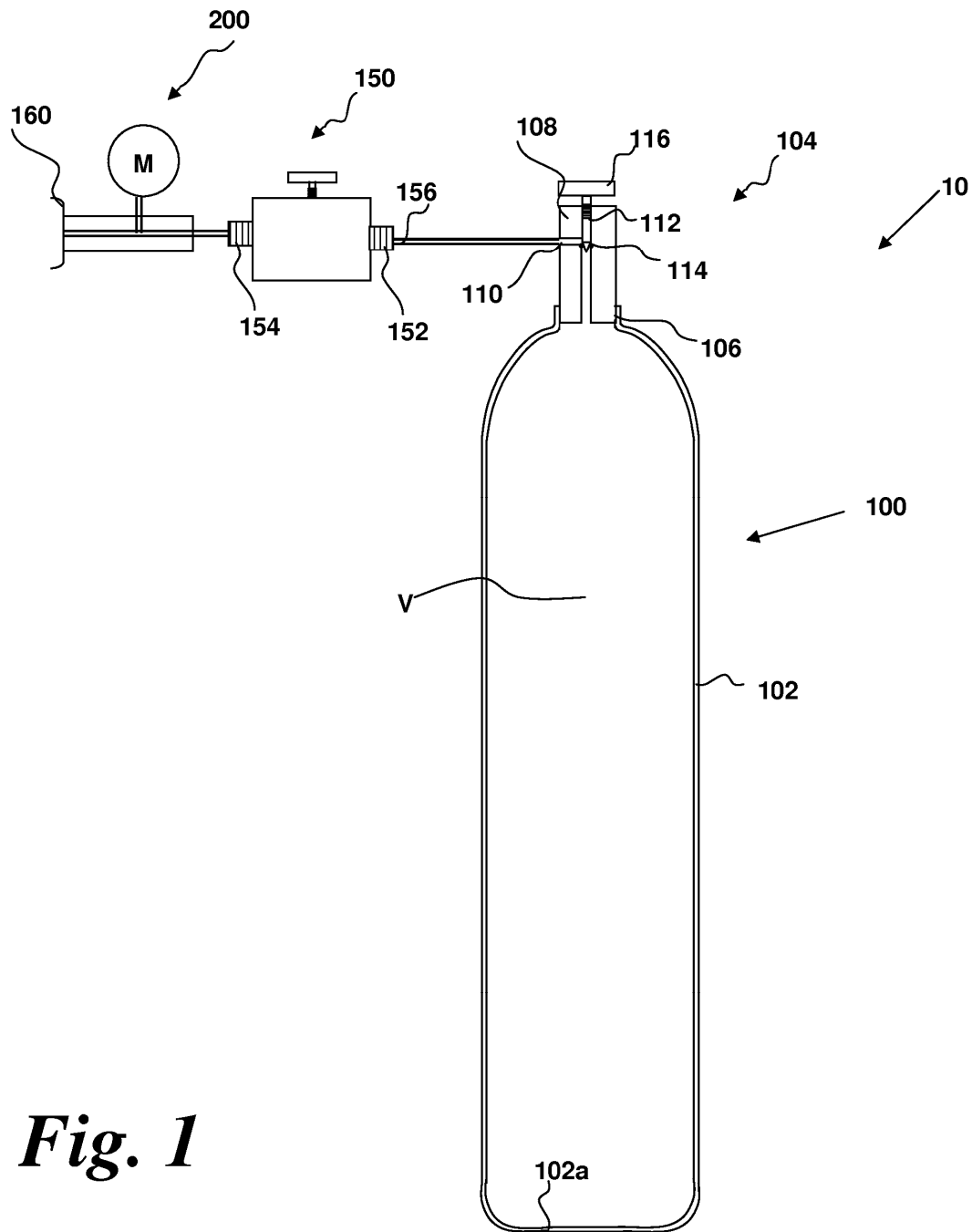


Fig. 1

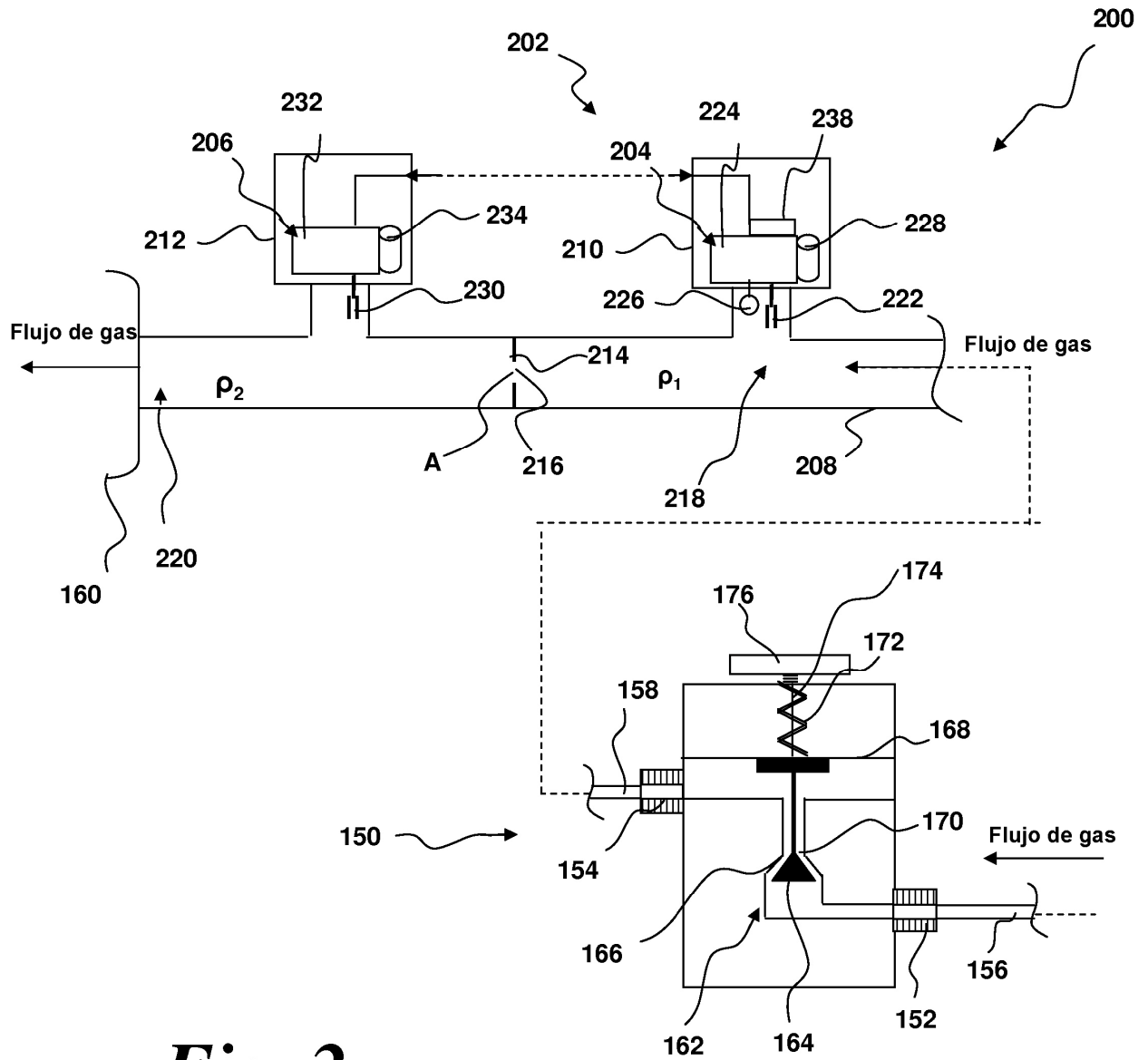


Fig. 2

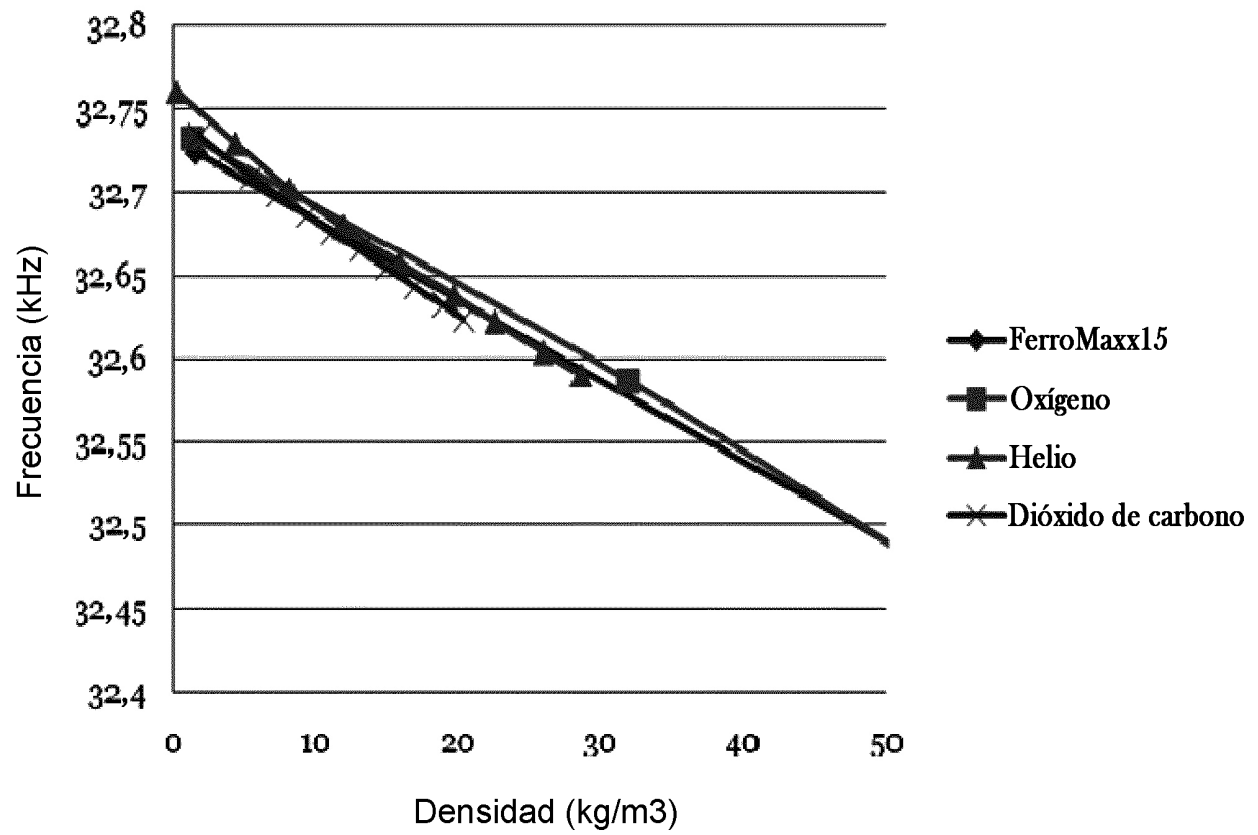


Fig. 3

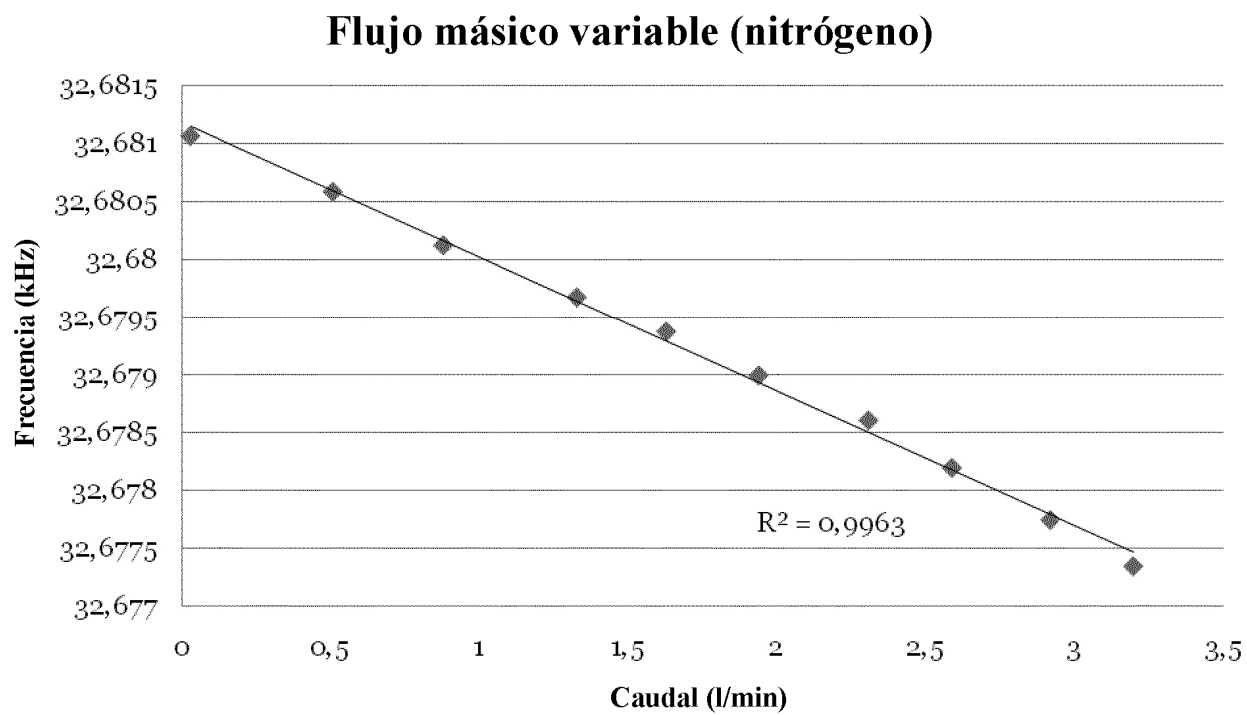


Fig. 4

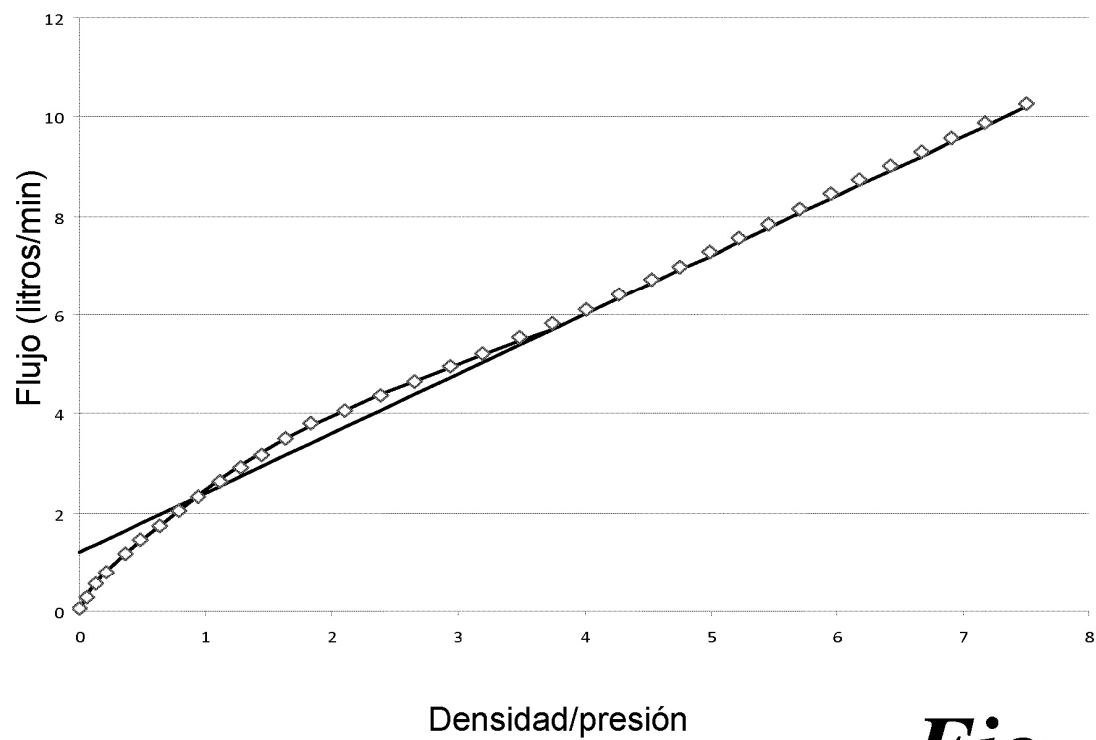


Fig. 5

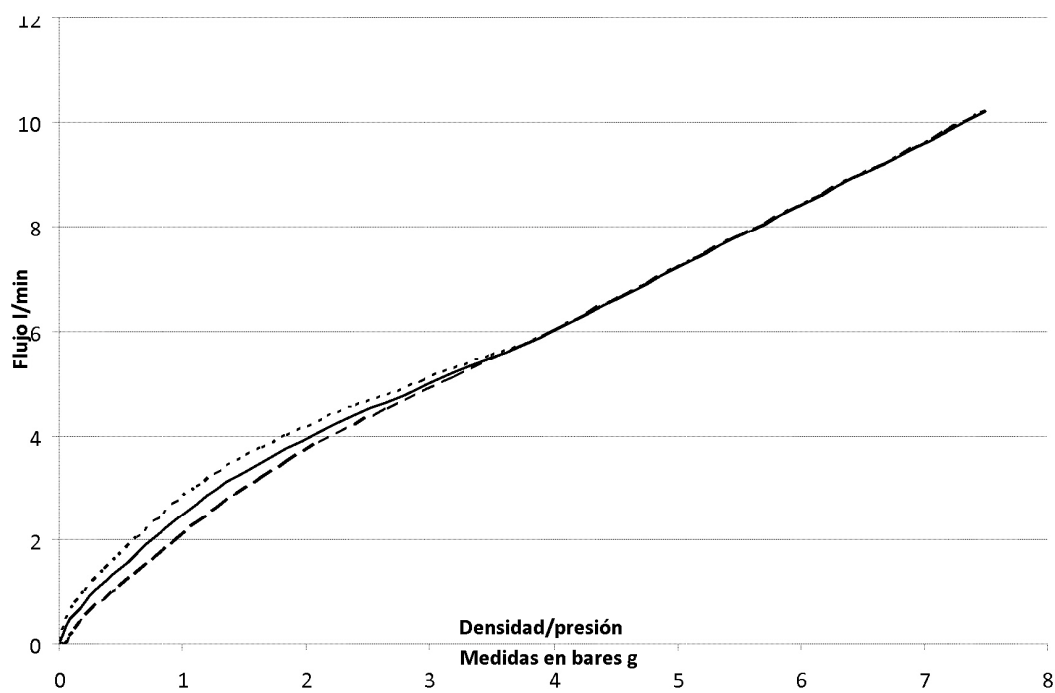
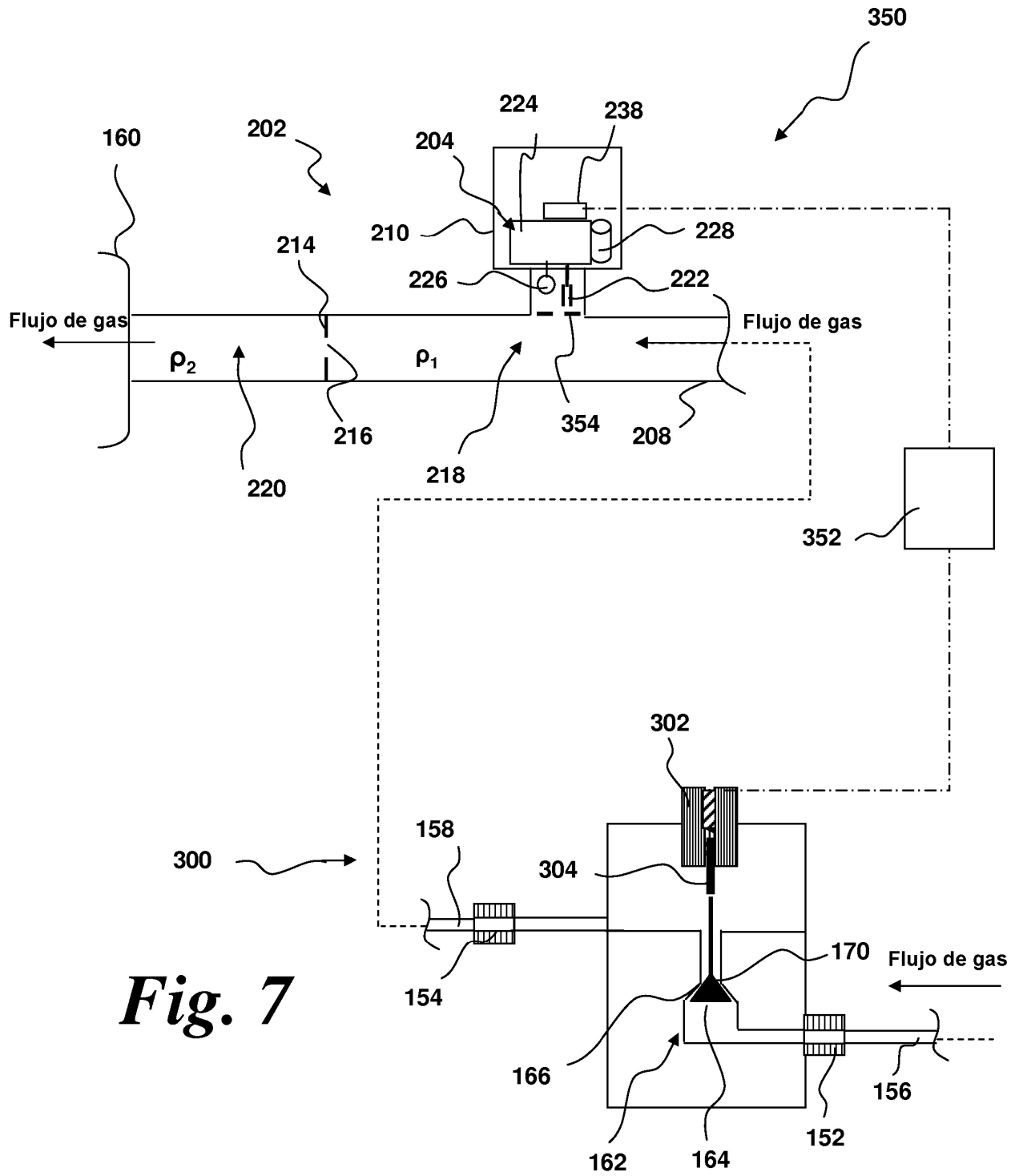
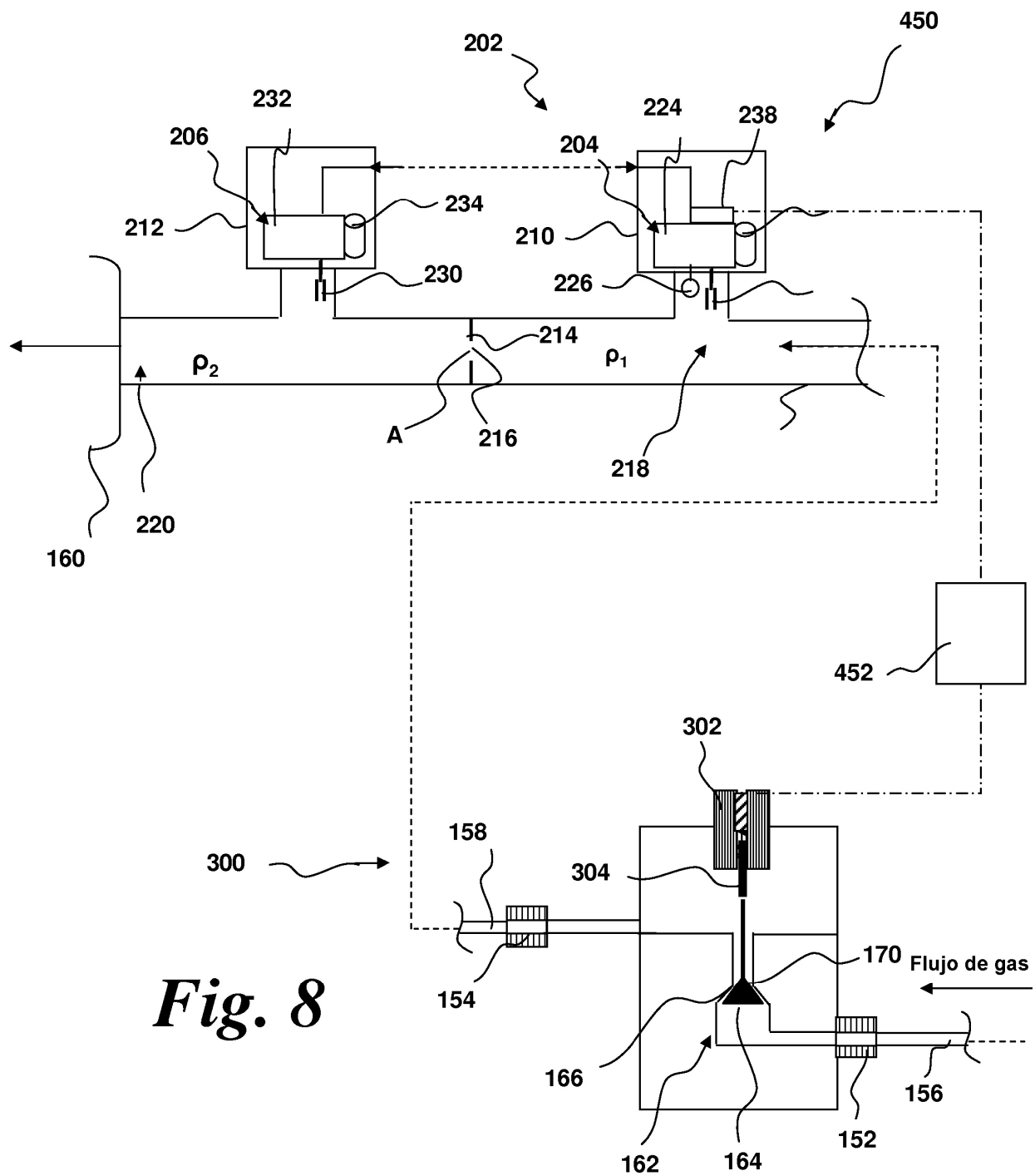


Fig. 6





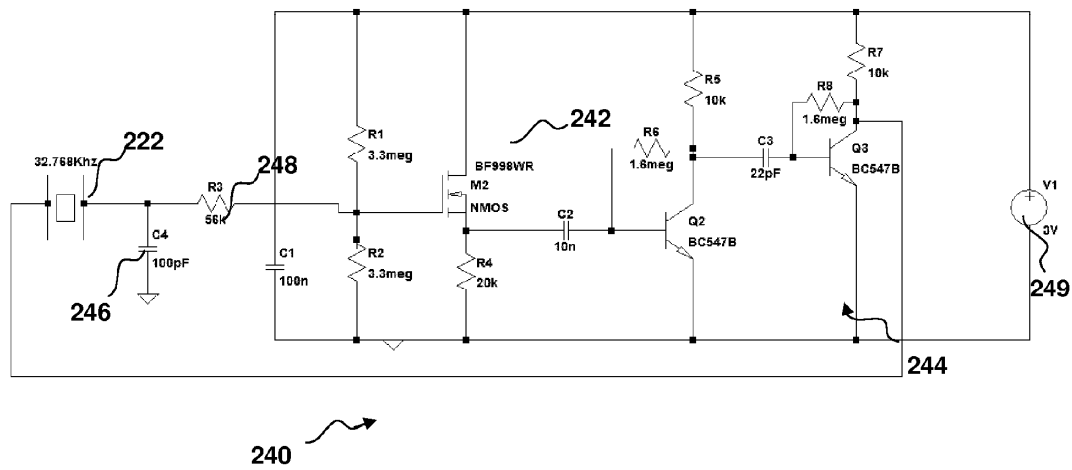
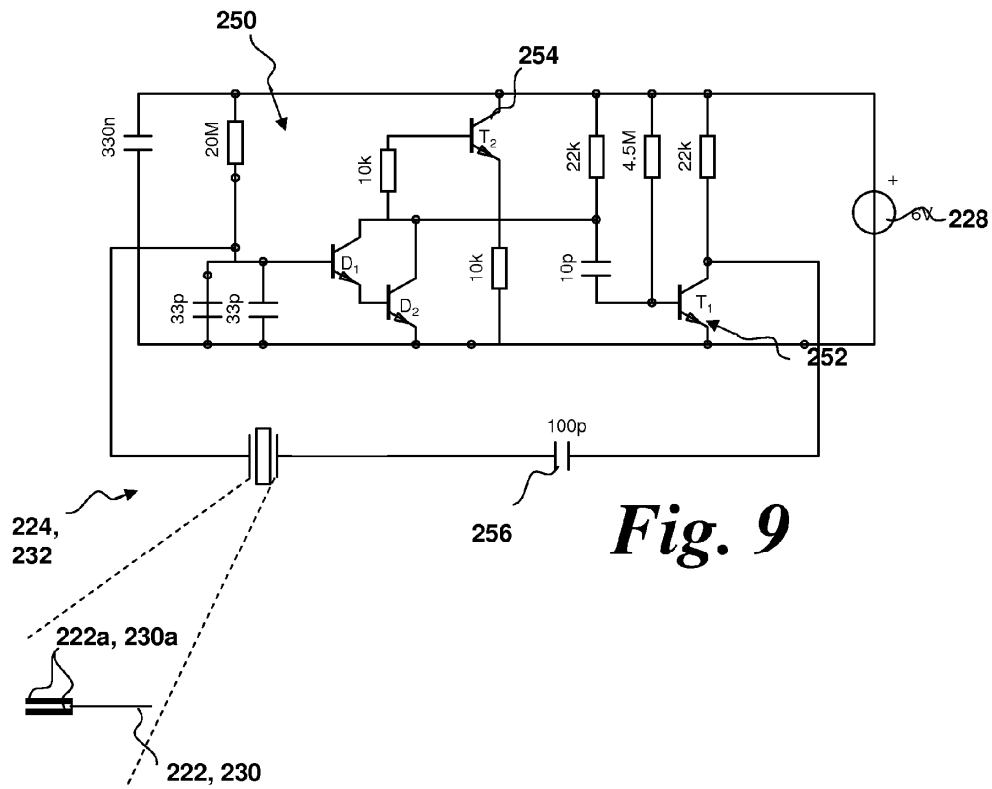


Fig. 10

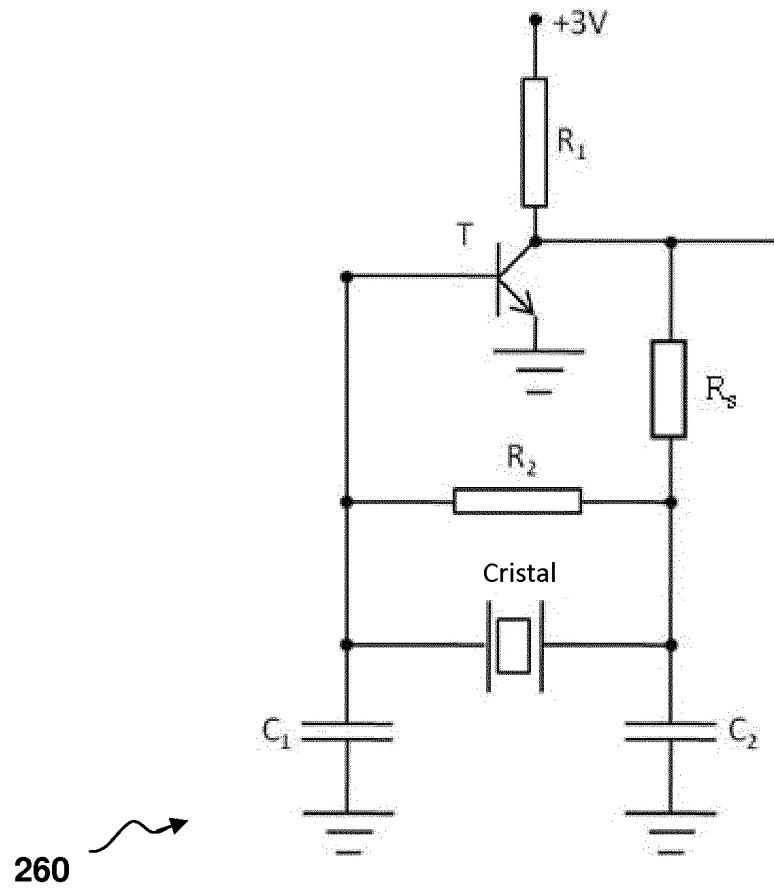


Fig. 11

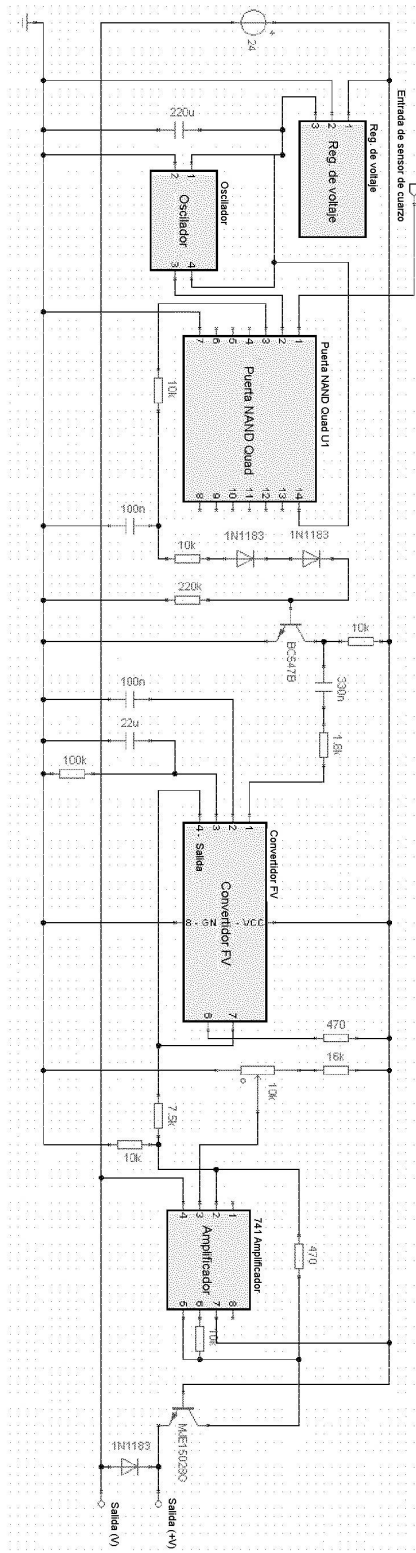


Fig. 12

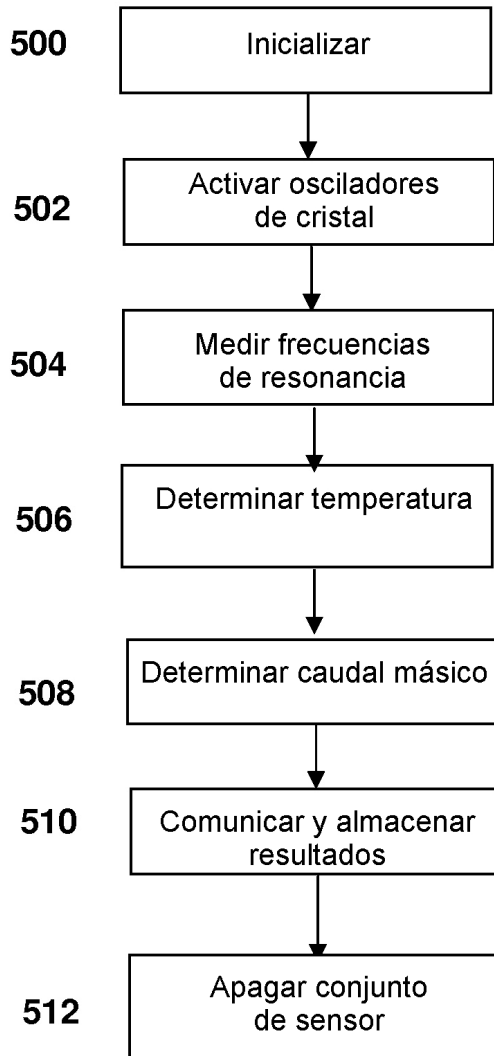


Fig. 13

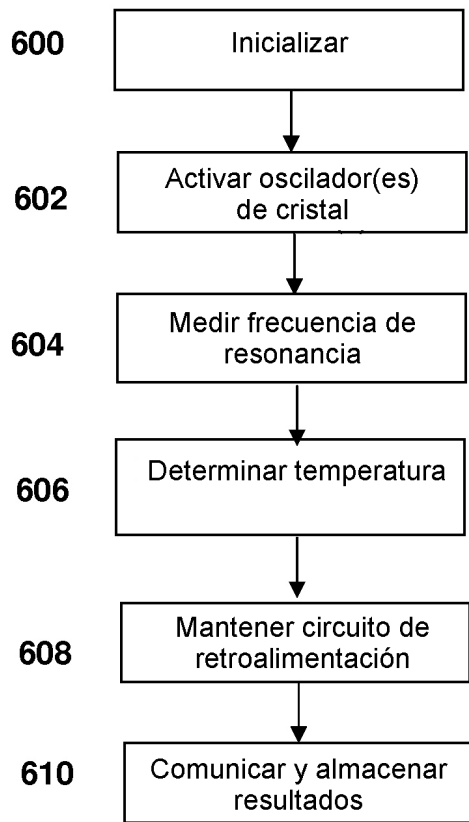


Fig. 14

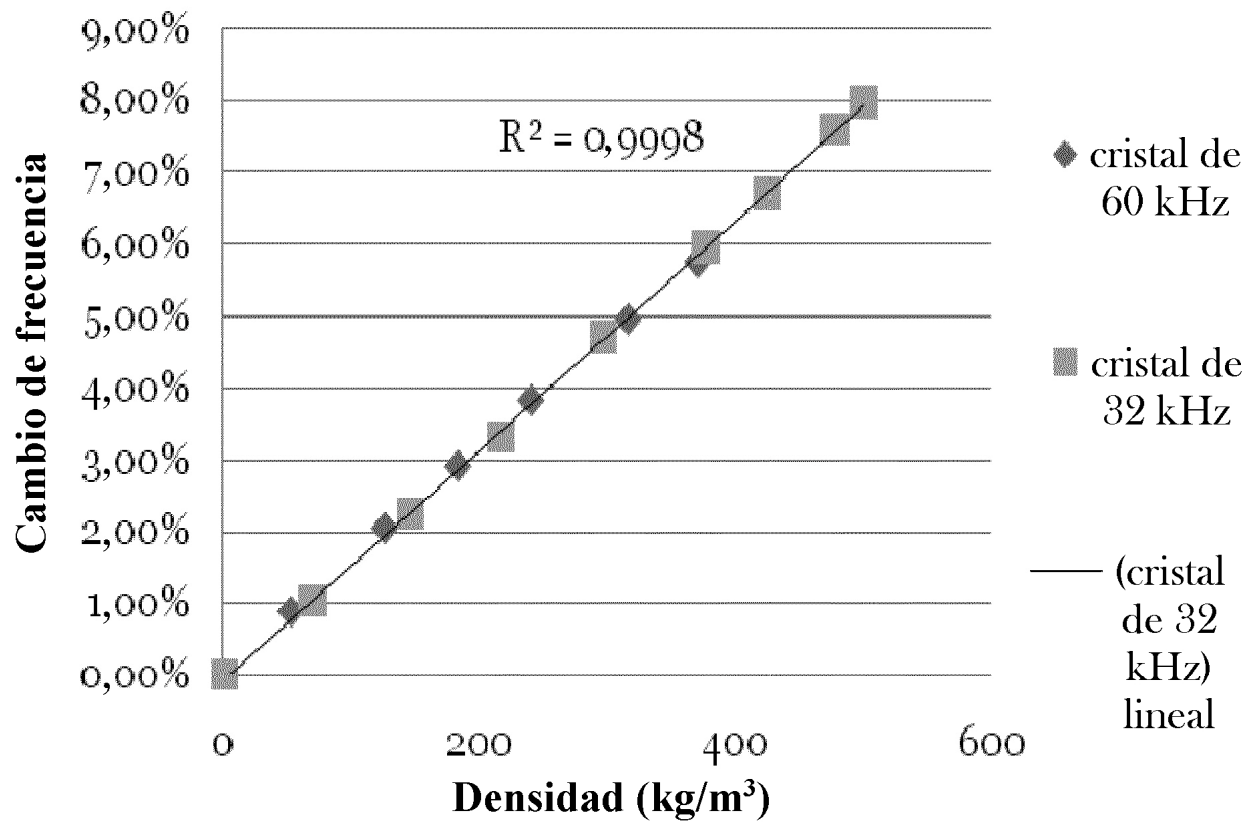


Fig. 15

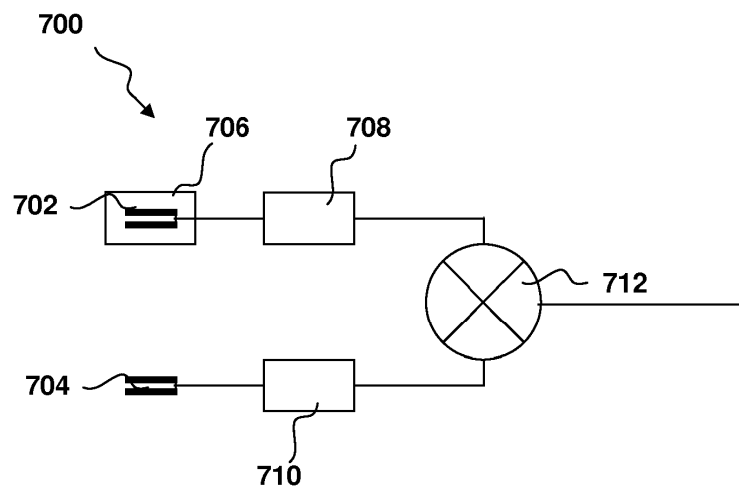


Fig. 16

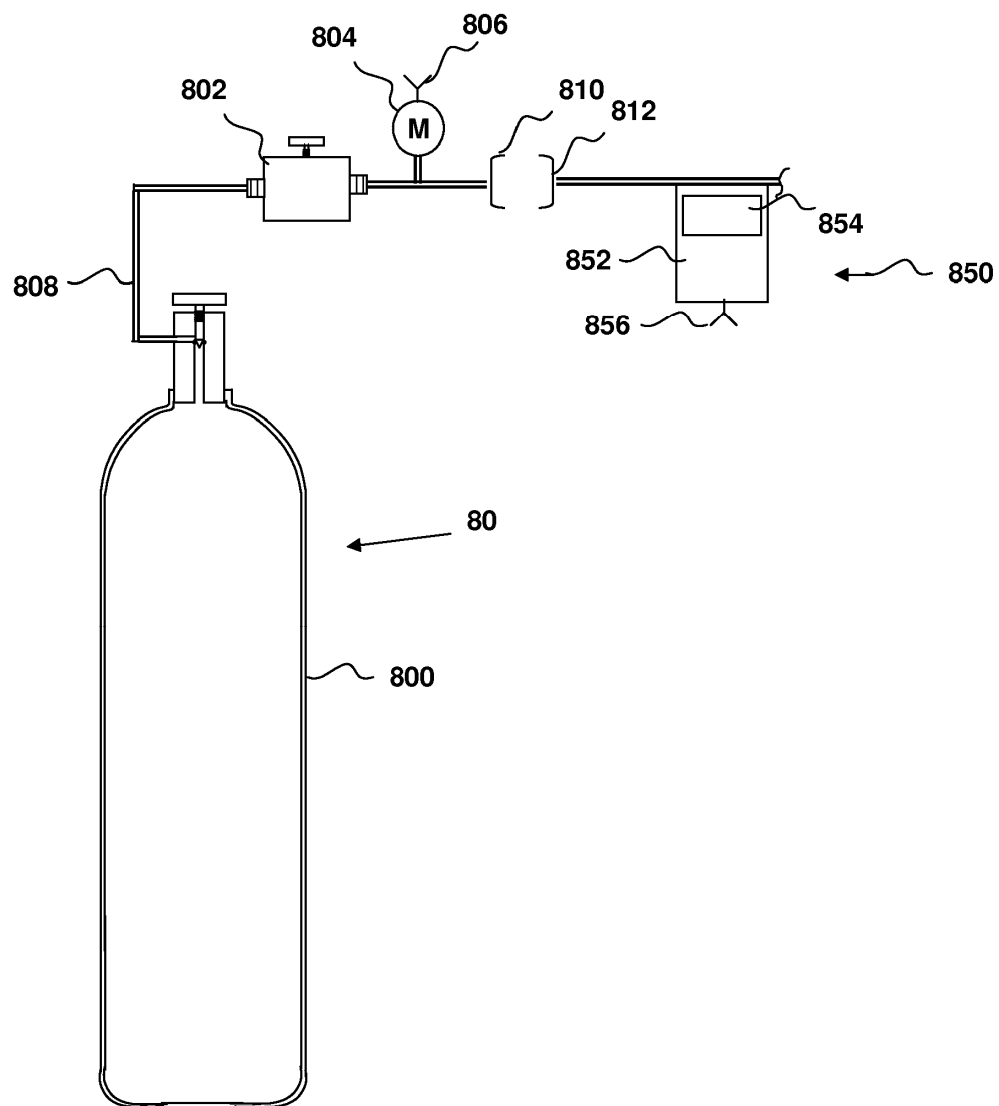


Fig. 17