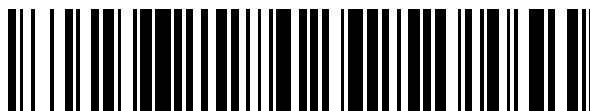


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 781 304**

51 Int. Cl.:

F01N 3/023

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.02.2017** **PCT/EP2017/053201**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.08.2017** **WO17144301**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.02.2017** **E 17704026 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.03.2020** **EP 3420207**

54 Título: **Limpieza de filtros**

30 Prioridad:

24.02.2016 BE 201605130

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

01.09.2020

73 Titular/es:

TISTECH SPRL (100.0%)
Avenue Général Michel 1E
6000 Charleroi, BE

72 Inventor/es:

LUDIK, LASZLO

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 781 304 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

Limpieza de filtros

Campo de la invención

La presente invención se refiere en general a un proceso y un aparato para limpiar y eliminar depósitos de partículas en un filtro de partículas, en particular para la eliminación en seco de depósitos de cenizas con un filtro de partículas de diesel o gasolina. En comparación con los procedimientos conocidos de la técnica, el método de la presente invención se basa en la provisión de un proceso de dos etapas que incluye una etapa en donde el filtro se expone a una frecuencia resonante estructural bajo presión y una etapa en donde el filtro se expone a un flujo inverso. La combinación de una frecuencia de resonancia estructural con un flujo inverso da como resultado una eliminación eficiente en dos etapas de los escombros del filtro sin causar ningún daño al cuerpo cerámico del filtro.

Antecedentes de la invención.

En los últimos años, han surgido legislaciones más estrictas sobre emisiones de escape en todo el mundo. Entre estas se encuentran restricciones en la cantidad de partículas (hollín) que puede producir el vehículo. Una solución a este problema es el uso de un filtro de partículas (PF) en la corriente de escape de un motor diesel o de gasolina. El PF atípico es un cuerpo cerámico en forma de cilindro (carburo de silicio o cordierita): una estructura de panal con muchos canales paralelos diferentes. Los canales adyacentes están cerrados en cada extremo mediante tapones para forzar que el gas de escape penetre a través de las paredes. El hollín del escape se acumulará en estas paredes. De vez en cuando este hollín acumulado debe quemarse, la llamada etapa de regeneración. Durante la regeneración, la temperatura de escape se eleva artificialmente, por ejemplo, mediante una inyección secundaria de diesel o inyección principal retardada. La regeneración se gestiona principalmente de forma automática mediante la ECU del vehículo. En teoría, este proceso desobstruye el filtro quemando el hollín en CO y CO₂. En la práctica, ningún proceso de combustión es perfecto (especialmente en vehículos que solo hacen viajes cortos, debido a las bajas temperaturas de escape) y también se forman cenizas y se acumulan en el filtro (durante la regeneración, pero también durante la operación normal). Esta ceniza no se elimina por regeneración (ya que la ceniza ya está quemada), y después de un tiempo la contrapresión sobre el PF, causada por la acumulación de ceniza, será demasiado alta para que el motor pueda superarla. En ese punto, el DPF necesita ser reemplazado o limpiado. En Europa, las regulaciones de emisiones se han vuelto tan estrictas que un PF se ha vuelto necesario. Sin embargo, en los Estados Unidos, debido a las regulaciones para el transporte pesado (camiones...), los PF son comunes. Por lo tanto, el mercado estadounidense ha desarrollado varios medios para limpiar estos filtros, ya que el reemplazo es una opción costosa.

Se identifican dos enfoques principales de limpieza: el enfoque químico o húmedo y el enfoque físico o seco. En el enfoque húmedo, se introduce un líquido de limpieza (principalmente a base de agua) bajo presión y, a veces, calentado, en el filtro y forzado a través de los canales para limpiar las cenizas y las partículas de hollín. El fluido a veces se mezcla con gas a presión para formar burbujas para mejorar la limpieza. En algunos casos, las ondas ultrasónicas también se introducen en el líquido para mejorar la limpieza. Sin embargo, un paso crítico en este proceso es el secado final de las partes internas del filtro con aire (caliente). Cualquier humedad restante en el filtro puede crear expansiones violentas de vapor, ya que las temperaturas de escape están en los cientos de grados centígrados: en estas condiciones, el agua se convertirá instantáneamente en vapor. Estas expansiones pueden dañar irreparablemente el filtro, por lo tanto, un punto débil importante para la limpieza en húmedo. Una segunda observación es el hecho de que, según el estándar EURO 6, los filtros de partículas están recubiertos con un catalizador para aumentar la eficiencia. Algunos líquidos de limpieza pueden dañar este recubrimiento, por lo que se necesitan fluidos especiales. Por último, el fluido usado debe eliminarse de una manera ambientalmente racional o filtrarse para volver a usarse. La limpieza química se debe a estos motivos no deseados.

Sin embargo, los procesos físicos desarrollados solo utilizan las propiedades para las que se diseñó el filtro: presión y flujo de aire. Las partículas acumuladas se eliminan mediante una ráfaga de aire a presión (limpieza por pulso de aire). Las partículas desalojadas son expulsadas posteriormente por el flujo de aire. Por lo tanto, no se introduce materia extraña en el filtro. Otros procesos secos utilizan boquillas de aire en movimiento dirigidas hacia las aberturas del filtro para soplar cualquier bloqueo, véase por ejemplo, el documento WO 201175598. Por último, a veces se emplean vibraciones mecánicas para desalojar material particulado, por ejemplo, patente DE 102004029640 y WO201156477. La referencia japonesa JP H08 177 462, utiliza la combinación de vibraciones y una corriente de aire, pero de tal manera que se aplica una corriente de aire puro como contracorriente a una corriente de aire sucio que sale del filtro, y en donde durante el ajuste de esta contracorriente de aire puro se genera una descarga o vibración del filtro. Estas vibraciones son producidas por un motor desequilibrado, pero no se afirma que estén relacionadas con ninguna propiedad de resonancia. Solo se menciona la "frecuencia de entrada y de disminución", orden de magnitud de 100Hz y 10mm durante 5-10 minutos. Sin embargo, este proceso también está relacionado con la limpieza química. La patente EP 1162351 de PSA también aplica vibraciones mecánicas, pero en esta patente las vibraciones se originan desde el propio ICE, durante la operación. En lugar de vibraciones mecánicas en estos métodos de limpieza en seco, se pueden emplear igualmente ondas acústicas (véase el documento US2007/0137150), pero como en los casos anteriores, la aplicación de vibraciones siempre es parte de un paso del proceso en el que corre un flujo de gas a través del ensamblaje.

El principal problema con los enfoques secos es que están diseñados teniendo en cuenta los PF de grandes camiones. Estos PF de camiones son esencialmente cilindros cerámicos grandes y, por lo tanto, son fáciles de soplar aire: se puede acceder a toda el área superior e inferior del filtro. El problema con los filtros de partículas montados en los automóviles es que están contenidos en los tubos de escape. El cuerpo cerámico del filtro no se puede quitar fácilmente del tubo. El tubo de escape que contiene el filtro generalmente tiene tuberías conectadas a la entrada y a las salidas. Estas entradas y salidas también son más estrechas que el cuerpo del filtro. Todas estas propiedades complican el proceso de limpieza en seco, ya que la presión del aire no podrá golpear uniformemente el cuerpo del filtro. Se han propuesto algunas soluciones con base en la limpieza de PF de camiones existente, por ejemplo, mediante la introducción sucesiva de conos y anillos en el tubo del filtro, para aplicar selectivamente presión de aire a una parte del filtro. Sin embargo, estas herramientas accesorias deben construirse para cada tamaño de filtro, y para algunas formas de filtro más complejas, las herramientas propuestas no podrán introducirse. Además, se pierden fácilmente y se puede olvidar sacarlas del tubo después de la limpieza, bloqueando el filtro. El tiempo de trabajo manual también aumentará. Otras soluciones propuestas son una boquilla de anillo inferior dentro del tubo y girarla alrededor de la superficie del cuerpo del filtro, aplicando un flujo de aire a cada parte del filtro. Sin embargo, esto requiere una entrada directa al filtro o un mecanismo complejo y un sistema de medición para determinar la distancia al cuerpo del filtro, para evitar daños. Por lo tanto, la introducción de boquillas es un método bastante complicado, debido a las diferentes formas y tamaños de los DPF de automóviles.

Teniendo en cuenta los puntos débiles de los sistemas húmedos, la realización preferida de la solución para la limpieza de DPF para automóviles es un proceso en seco. Al observar las 'soluciones' existentes para los problemas antes mencionados, está claro que son bastante complejas, en comparación con la limpieza DPF de camiones, o poco elegantes y que requieren diferentes herramientas adicionales. Sin embargo, se desea mantener el sistema simple para el operador, por ejemplo, rentable sabio.

Breve descripción de los dibujos

Con referencia específica ahora a las figuras, se destaca que los detalles mostrados son a modo de ejemplo y con fines de discusión ilustrativa de las diferentes realizaciones de la presente invención solamente. Se presentan con el objetivo de proporcionar lo que se cree que es la descripción más útil y fácil de los principios y aspectos conceptuales de la invención. A este respecto, no se intenta mostrar detalles estructurales de la invención con más detalle del necesario para una comprensión fundamental de la invención. La descripción tomada con los dibujos hace evidente a los expertos en la materia cómo las diversas formas de la invención pueden realizarse en la práctica.

Figura 1: Representación esquemática de un sistema neumático (medios de flujo de aire para generar una presión o flujo de aire presurizado en el filtro de partículas (FAP)) en un sistema de la presente invención. El aire presurizado se alimenta al sistema por medio de un compresor a través de la válvula (1) de entrada, en donde una primera rama acciona los motores (10) de vibración. En la realización de ejemplo, esta rama incluye además un manómetro (13) y una válvula (14) para determinar y controlar la presión en los motores de vibración. La válvula (15) permite abrir la segunda rama de la presión de alimentación del sistema neumático y/o un flujo de aire presurizado a través del filtro de partículas (FAP). En el método de limpieza de dos pasos de la presente invención, en el primer paso en donde el FAP se impone a la resonancia estructural mientras está bajo presión en una primera dirección, las válvulas (17) y (17') están cerradas y las válvulas 16 y 16' están abiertas con las válvulas (18) y (19) cerradas en la salida. En esta configuración, el aire presurizado pasará a través de la válvula (16) hacia un extremo del FAP (lado izquierdo en la representación esquemática) y evacuará a través de la válvula (16') hacia las válvulas (18) y (19) de salida. En el segundo paso, las válvulas (16) y (16') están cerradas y las válvulas (17) y (17'), así como la válvula (19) de salida. En esta configuración, el aire presurizado pasará por la válvula (17) hacia el extremo opuesto de la FAP (lado derecho en la representación esquemática) y evacuará a través de la válvula (17') hacia las válvulas (18) y (19) de salida. En la rama de salida, la válvula (18) y el manómetro (20) se utilizan para medir la obstrucción del filtro como la presión diferencial con la presión de entrada en el manómetro (21). Para limpiar el filtro de hollín, la válvula (19) de salida se abre durante esta segunda etapa del proceso de limpieza. En el primer paso, esta válvula y la válvula (18) están cerradas. Como tal, en este primer paso no hay flujo de aire a través del FAP, simplemente se pone bajo presión y al estar bajo presión, el filtro está expuesto a vibraciones por los motores de vibración. En el segundo paso, las vibraciones se cierran al cerrar la válvula (14) de motor de vibración. Por lo tanto, en el proceso de dos etapas, durante el primer paso no hay flujo de aire a través del filtro y en el segundo paso el filtro no está expuesto a la agitación mecánica, es decir, no está expuesto a golpes o vibraciones.

Figura 2: Representación esquemática de un sistema neumático alternativo (medios de flujo de aire para generar una presión o flujo de aire presurizado en el filtro de partículas (FAP)) en un aparato de la presente invención. El aire presurizado se alimenta al sistema por medio de un compresor a través de la válvula (1) de entrada, en donde una primera rama acciona los motores (10) de vibración. En esta realización alternativa y diferente del esquema de la figura 1, esta rama incluye además un lubricador (23) para alimentar aceite en el aire presurizado que acciona los motores de vibración. Otra diferencia está en la entrada de aire presurizado que ahora incluye una unidad (22) de tratamiento de aire. En esta unidad de tratamiento de aire, un filtro (por ejemplo de 5 µm) y un regulador de presión aseguran que el aire limpio a una presión estable ingrese al sistema. Como en el esquema anterior, la segunda rama incluye la válvula (15) y los manómetros (20) y (21) con una salida hacia el receptáculo (9) de partículas. La configuración de las válvulas en cualquier extremo del filtro de partículas (FAP) es diferente. En lugar de una configuración paralela doble, el par de válvulas está ahora en una configuración cruzada con respecto al filtro. Con las

válvulas (25) y (25') cerradas, las válvulas (24) y (24') se utilizan en el primer paso y en la medición de la limpieza del filtro a través del manómetro (20). Con las válvulas (24) y (24') cerradas, las válvulas (25) y (25') se utilizan en el segundo paso para evacuar las partículas sueltas del filtro hacia el receptáculo (9). En esta realización, las válvulas (25), (25') y la válvula (24') están cerradas, y la válvula (24) está abierta durante el primer paso del método de limpieza, y las válvulas (24) y (24') están cerradas, y las válvulas (25) y (25') están abiertas durante el segundo paso del método de limpieza de acuerdo con la invención. Por lo tanto, de nuevo, con las características de la aplicación instantánea de que no hay flujo de aire a través del filtro durante el primer paso, y no hay agitación mecánica del filtro durante el segundo paso.

Figura 3: Esquema de modulación de válvula de circuito abierto para un sistema de la presente invención, que comprende un compresor (100) que carga un tanque (2) de aire presurizado. Las válvulas (3), (12) de acción rápida en cada extremo (por ejemplo, en el lado (102) de escape y en el lado (103) del motor) del FP y bajo el control de un microcontrolador (4) permiten controlar la presión del aire dentro del FP. Un conector (5) flexible y un capó (6) aseguran un ajuste perfecto para el primer extremo del PF (7), en el ejemplo que se muestra en el lado del escape). Dicho PF está sujeto en el aparato por una mesa (8) de elevación con una abertura que acomoda el otro lado (por ejemplo, motor) del PF. Un conector flexible adicional proporciona un conducto a un receptáculo (9) de cenizas. Un motor (10) de vibración, igualmente bajo control del microcontrolador (4), para exponer el FP a una frecuencia resonante estructural cuando está bajo presión.

Figura 4: Esquema de modulación de válvula de circuito abierto para un sistema de la presente invención, similar al sistema mostrado en la figura 1, pero que además comprende un acelerómetro (11) para medir la vibración del filtro. El acelerómetro proporcionará una entrada al controlador (4) para ajustar la frecuencia del motor (10) de vibración.

Figura 5: Vista lateral en sección transversal de un sistema de la presente invención, que muestra la válvula (1) de entrada y los dos pares de válvulas (16 y 16') y (17 y 17') utilizadas para controlar la orientación del aire a presión en el filtro. Además, muestra una unidad (22) de tratamiento de aire para filtrar el aire entrante y asegurar una presión de entrada constante (normalmente se establece en 4,5 bar para el sistema) para el sistema. En la rama que alimenta los motores de vibración, esta realización muestra además la presencia de un lubricador (23) que inyecta aceite dentro del aire de esta parte del sistema neumático. La presencia de dicho lubricador extiende la vida útil de los motores de vibración.

Figura 6: vista frontal en sección transversal de un sistema de la presente invención,

Figura 7: Vista frontal en perspectiva del sistema que se muestra en las figuras 5 y 6.

Figura 8: comparación de la presión del diafragma (dirección normal del flujo de aire) entre el nuevo FP y el FP sucio

Figura 9: comparación de la presión del diafragma (dirección inversa del flujo de aire) entre el nuevo FP y el FP sucio

Descripción detallada de la invención

La solución actualmente prevista para el problema descrito anteriormente es explotar la resonancia estructural del elemento del cuerpo del filtro al soltar las partículas de hollín. Cada objeto físico tiene frecuencias de resonancia estructural (la cantidad depende de los grados de libertad del objeto, por lo que en un objeto continuo hay una cantidad infinita): frecuencias en las que un objeto vibrará fácilmente cuando se excita, sin mucha entrada de energía.

Por lo tanto, esta frecuencia se puede utilizar en un proceso de limpieza: al excitar una frecuencia resonante (preferiblemente la primera), todo el cuerpo del filtro comenzará a vibrar, desalojando las partículas de la pared del filtro. Esta excitación puede hacerse mecánicamente aplicando un agitador o similar, o (más elegantemente) imponiendo ondas de sonido de la frecuencia deseada en el flujo de aire en el tubo del filtro, comparable a la forma ampliamente conocida de romper un vidrio con sonido (pero en este caso obviamente con una energía más baja, para evitar romper el cuerpo del filtro de cerámica). Estas ondas de sonido pueden ser creadas por un altavoz (o más generalmente una membrana vibratoria) o modulando la abertura de una válvula de presión de aire (si el ancho banda es lo suficientemente alto para esta aplicación). La vibración del cuerpo a frecuencias diferentes a la resonancia probablemente también soltará algunas partículas, pero a costa de una mayor entrada de energía para la misma amplitud de vibraciones y, por lo tanto, una menor eficiencia.

En los métodos conocidos, la vibración del cuerpo del filtro para soltar las partículas siempre se realiza en combinación con un flujo de aire presurizado soplado a través del filtro. Ahora se ha encontrado que se logran resultados optimizados cuando las frecuencias de resonancia estructural se aplican mientras el filtro se mantiene bajo presión pero en ausencia de flujo de aire, después de la exposición a la vibración durante un tiempo suficiente para desalojar las partículas del filtro, un flujo de aire presurizado se sopla a través del filtro en la dirección opuesta a la presión aplicada en el paso de soltar. Estos pasos consecutivos (soltar bajo presión y soplar en la dirección opuesta) pueden repetirse un número de veces hasta lograr la limpieza deseada del filtro.

Por lo tanto, es un primer objeto de la presente invención proporcionar un método de dos etapas para limpiar un filtro de partículas comprendiendo dicho método;

- una primera etapa que impone el filtro a una frecuencia resonante estructural mientras está bajo presión de aire aumentada en un primer sentido, y
- una segunda etapa que impone al filtro un flujo de aire en un sentido opuesto al primer sentido; caracterizado porque no hay flujo de aire a través del filtro en la primera etapa, y la presión de aire en el filtro aumenta a una presión de aproximadamente 4,5 bar a 6,0 bar.

En la primera etapa, el filtro se mantiene bajo una presión de aire aumentada, pero a diferencia de los procedimientos conocidos de la técnica, no hay flujo de aire a través del filtro en esta primera etapa. El filtro simplemente se mantiene a una presión aumentada durante la primera etapa. En las realizaciones de ejemplo, las frecuencias resonantes estructurales se imponen al filtro por medio de un motor de vibración, en particular un motor de vibración neumático. En una realización, el motor de vibración está alineado con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro. En otra realización, el motor de vibración está alineado en ángulo recto con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro. En una realización preferida, hay al menos dos motores de vibración, en particular motores de vibración neumáticos, en donde al menos uno de dichos motores de vibración está alineado con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro, y en donde al menos uno de los motores de vibración está alineado en ángulo recto con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro. En el contexto de la aplicación instantánea, los motores de vibración deben ser capaces de alcanzar altas frecuencias de vibración (al menos un par de cientos de Hertz) y tener una fuerza centrífuga suficiente (al menos 1900 Newton). Cualquier motor de vibración que cumpla con estas características es desplegable en el método de la presente invención. Preferiblemente, los motores de vibración utilizados son neumáticos, ya que en la aplicación instantánea se necesita un compresor de aire para soplar un flujo de aire a través del filtro, y dicha instalación de compresión de aire está típicamente presente en un garaje. En una realización, el método de la presente invención se caracteriza además porque el filtro no está expuesto a agitación mecánica durante la segunda etapa del método de limpieza. Durante la segunda etapa, el filtro no está expuesto a una frecuencia resonante estructural.

En una realización particular, la frecuencia resonante estructural está en la primera frecuencia resonante, o en frecuencias armónicas a valores múltiples de la frecuencia principal del filtro. Las frecuencias principales de los filtros comienzan en 90 Hz hasta aproximadamente 110 Hz. Las frecuencias de vibración del motor de vibración comienzan igualmente en estos valores y hasta aproximadamente 1870 Hz. En una realización preferida, la frecuencia resonante estructural está en la primera o segunda frecuencia armónica de la frecuencia resonante principal. En una realización más preferida, la frecuencia de vibración está dentro del intervalo de 180 a 1870 Hz; aún más preferible dentro de un intervalo de frecuencia de 350 Hz a 1870 Hz; aún más en particular a una frecuencia de aproximadamente 1480 Hz.

El método de 2 pasos descrito anteriormente puede realizarse en un solo ciclo, o en una pluralidad de ciclos consecutivos. Como es evidente a partir de los ejemplos a continuación, usando el método de la aplicación instantánea, incluso un ciclo simple es suficiente para llevar el filtro a su condición original. Además (infra), el método es igualmente eficiente para un filtro mantenido en posición horizontal.

A diferencia de los sistemas de limpieza PF existentes en los que el filtro de partículas está típicamente orientado con la parte sucia (lado del motor) hacia abajo (orientación vertical), la gravedad también puede ayudar en la extracción de las partículas desalojadas, utilizando el método de dos pasos de la presente invención no requiere realmente tal orientación. Con válvulas en el sistema en cada extremo del filtro de partículas, tanto la orientación del flujo de aire como la presión dentro del filtro pueden regularse, lo que hace que la orientación vertical ayude a limpiar el filtro opcional. Además, se necesita un sello hermético alrededor de cada extremo del filtro de partículas para evitar que el aire escape a esta ruta de baja resistencia. Por lo tanto, en una realización adicional, el sistema de la presente invención comprende además la provisión de un sello hermético alrededor de cualquier extremo del filtro.

En otra realización, el método se caracteriza porque el aire presurizado se sopla a través del filtro de partículas en la dirección opuesta a la dirección de la presión del aire en la primera etapa de la limpieza; en particular, el aire presurizado se sopla a través del filtro de partículas en la dirección de la parte sucia (lado del motor); En una realización particular, el filtro de partículas está orientado con la parte sucia hacia abajo.

La determinación de las propiedades resonantes de los filtros de partículas debe hacerse por adelantado probando los tipos más importantes. La medición en línea aún puede resultar necesaria, debido a las diferencias entre las propiedades resonantes de los filtros limpios y obstruidos.

La implementación práctica del proceso puede basarse en la adaptación de un limpiador de pulso existente. Se necesitarán cambios en el sistema de entrada de aire, sellado y el software de la máquina existente. Además, algunos "adaptadores" externos simples probablemente deban construirse para acomodar el número de formas y tamaños diferentes de los PF de automóvil. El PF se colocará en este adaptador y el ensamblaje total se colocará en la máquina. Evidentemente, la implementación óptima se logra en un sistema diseñado específicamente para realizar el método de la presente invención. Tal sistema se divulga, por ejemplo, en las figuras 3 a 4 y en las figuras 5 a 7, pero en cualquier caso el filtro de partículas está montado en un soporte que permite que el filtro quede expuesto a una frecuencia de resonancia estructural por medio de medios de generación de vibración dentro del sistema y el filtro está herméticamente conectado en cualquier extremo a un sistema de tubos con medios de flujo de aire para generar una presión o flujo de aire presurizado en dicho filtro caracterizado porque el sistema de tubos con medios de flujo de aire

comprende válvulas en cada extremo del filtro de partículas por medio de las cuales se puede regular tanto la orientación como la presión dentro del filtro.

Por consiguiente, otro objeto de la presente invención es proporcionar un sistema para limpiar un filtro de partículas que funciona en un método de dos etapas de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 7, comprendiendo dicho sistema;

- 5 • medios de retención para soportar un filtro de partículas;
- medios de flujo de aire para generar una presión o flujo de aire presurizado en dicho filtro;
- medios de sellado para proporcionar un sello hermético en cualquier extremo del filtro;
- medios generadores de vibraciones para imponer el filtro a una frecuencia resonante estructural; y en donde dicho sistema se caracteriza porque comprende válvulas en cualquier extremo del filtro de partículas por medio de las cuales se puede regular tanto la orientación del flujo de aire como la presión dentro del filtro.

Una representación esquemática de una posible configuración de las válvulas en cualquier extremo del filtro de partículas se da en la figura 1. Dos conjuntos de válvulas operativas paralelas, respectivamente válvulas (16) y (16') y válvulas (17) y (17') permiten controlar la dirección del aire presurizado sobre el filtro de partículas. A través de las válvulas (18) y (19) en la rama de salida se puede controlar la presión sobre el filtro. En el primer paso del proceso de limpieza, es decir, en donde el FAP se impone a la resonancia estructural mientras está bajo presión en una primera dirección, las válvulas (17) y (17') están cerradas y las válvulas (16) y (16') están abiertas con las válvulas (18) y (19) en la salida están cerradas. En esta configuración, el aire presurizado pasará a través de la válvula (16) hacia un extremo de la FAP (lado izquierdo en la representación esquemática) y evacuará a través de la válvula (16') hacia las válvulas (18) y (19) de salida cerradas con presión acumulada sobre el filtro. En el segundo paso, las válvulas (16) y (16') están cerradas y las válvulas (17) y (17'), así como la válvula (19) de salida. En esta configuración, el aire presurizado pasará a través de la válvula (17) hacia el extremo opuesto de la FAP (lado derecho en la representación esquemática) y evacuará a través de la válvula (17') hacia las válvulas (18) y (19) de salida. En la rama de salida, la válvula (18) y el manómetro (20) se utilizan para medir la obstrucción del filtro como la presión diferencial con la presión de entrada en el manómetro (21). Para limpiar el filtro de hollín, la válvula (19) de salida se abre durante esta segunda etapa del proceso de limpieza. En el primer paso, esta válvula y la válvula (18) están cerradas. Como tal, en este primer paso no hay flujo de aire a través del FAP, simplemente se pone bajo presión y al estar bajo presión, el filtro está expuesto a vibraciones por los motores de vibración. En el segundo paso, las vibraciones se cierran cerrando la válvula (14) de motor de vibración.

Una representación alternativa de las válvulas en cualquier extremo del FAP y como se emplea en la realización de ejemplo de las figuras 5 a 7, se da en la figura 2. En esta realización, la rama que alimenta los motores de vibración es en realidad la misma e incluye una válvula (14) para controlar la presión en los motores (10) de vibración. En esta realización, la rama que alimenta los motores de vibración comprende además un lubricador (23) que inyecta aceite en el aire de esta parte del sistema neumático. Al igual que en el sistema anterior, otra válvula (15) permite la abertura de la segunda rama de la presión de alimentación del sistema neumático y/o un flujo de aire presurizado a través del filtro de partículas (PF) en el dibujo también conocido FAP. Un par de válvulas en cada extremo permite controlar la dirección, la presión y el flujo del aire presurizado en el PF. En el primer paso del proceso de limpieza de dos etapas, las válvulas (25) y (25') están cerradas, la válvula (24) está abierta y la válvula (24') está cerrada. Como tal, el aire presurizado pasará a través de la válvula (24) hacia un extremo de la FAP (lado derecho en la representación esquemática) con presión acumulada ya que la válvula (24') está cerrada. En la segunda etapa, las válvulas (24) y (24') están cerradas y las válvulas (25) y (25') están abiertas. En esta configuración, el aire presurizado pasará a través de la válvula (25) hacia el otro extremo del flujo de FAP (lado izquierdo en la representación esquemática) a través del filtro y evacuará a través de la válvula (25') y dentro del receptáculo (9). Nuevamente, durante el primer paso no hay flujo de aire presurizado a través del filtro y durante dicha primera etapa, los motores de vibración son operados y sometidos a presión abriendo la válvula (14), para desalojar las partículas del filtro. En la segunda etapa, los motores de vibración se cierran cerrando la válvula (14).

Los medios de retención para soportar el filtro de partículas pueden incluir cualquier dispositivo o estructura capaz de soportar el filtro de partículas en una condición presurizada mientras se expone a vibraciones de frecuencia de resonancia estructural, sin obstaculizar este último y la provisión de las frecuencias mencionadas anteriormente del mismo. Los medios de retención pueden incluir, por ejemplo, un anillo anular u otra estructura para enganchar por fricción el filtro de partículas. Alternativamente, los medios de retención podrían comprender simplemente una superficie con una abertura para soportar el filtro de partículas en una porción superior del mismo. Tal superficie puede comprender opcionalmente una estructura adicional como medios de acoplamiento, muescas, rebordes y bordes para facilitar una posición relativamente fija del filtro de partículas con respecto a la abertura. En otra realización alternativa, los medios de retención para soportar el filtro de partículas podrían comprender elementos estructurales que se aplican al filtro de partículas en un acoplamiento de agarre. A partir de estos ejemplos, será evidente para el experto en la materia que cualquier estructura alternativa para facilitar una posición relativamente fija del filtro con respecto al aire presurizado, está dentro de lo admitido por la presente invención. En la realización mostrada en las figuras 5 a 7, el filtro está acostado sobre un soporte horizontal (mesa o marco) con, por ejemplo, correas que unen el filtro al soporte.

En cualquiera de dichas configuraciones, y para evitar el escape de aire, en una realización preferida, los medios de retención comprenderán además medios de sellado para proporcionar un sello hermético en cualquier extremo del filtro. En la realización de ejemplo en los dibujos adjuntos 3 y 4, los sistemas realmente incluyen medios de retención (el capó (6) y la mesa con mecanismo (8) de elevación) para sujetar el DPF en su lugar, en donde dichos medios de retención comprenden medios de sellado para proveer una vía hermética a través del DPF. En la realización de ejemplo en la parte superior (lado de escape del DPF) del DPF, se coloca un capó conectado a una funda de caucho flexible. La funda flexible permite que el capó gire con un ángulo pequeño para acomodar el cierre hermético en la entrada de flujo de aire para los puertos de escape ligeramente angulados. El lado inferior (motor) del DPF se coloca sobre una mesa con una abertura, dicha abertura está cerrada herméticamente con un anillo de caucho. El tamaño del anillo se puede adaptar al tamaño de abertura del DPF.

En una realización alternativa, tal como por ejemplo, la utilizada en las figuras 5 a 7 en donde el filtro se encuentra sobre un soporte horizontal (mesa o marco), los medios (28, 29) de sellado son parte del sistema neumático. Para acomodar diferentes tamaños y formas de los PF de automóvil, dichos medios de sellado podrían ser ajustables, tales como, por ejemplo, un collar de caucho para conexión de tubería en tubería, o una conexión de funda. Alternativamente, estará disponible un conjunto de adaptadores para ajustar las aberturas de los PF de automóvil para que se ajusten a los sistemas de entrada (y salida) de aire del sistema (aparato) de limpieza de la presente invención. En la realización de ejemplo, dicho adaptador podría consistir, por ejemplo, en un collar o un adaptador de funda construido para proporcionar un ajuste deslizante para un tamaño de escape PF dado. El cierre hermético en cualquier extremo de los PF podría realizarse nuevamente utilizando medios conocidos en la técnica, tal como un collar de caucho para la conexión de tubería en tubería (véase figuras 6 y 7).

Como se deduce de lo anterior, la presente invención se basa en imponer en una primera etapa frecuencias de resonancia estructural en el filtro de partículas mientras se mantiene bajo presión en una primera dirección, seguida de una segunda etapa en donde el filtro se expone a un flujo de aire en la dirección opuesta. Dicho método y dispositivo por consiguiente requieren la presencia de medios generadores de vibraciones para imponer una frecuencia resonante estructural del filtro, y medios para controlar la orientación de la presión sobre el filtro. Para la implementación práctica, el sistema comprende en cada extremo del filtro una válvula dentro de la trayectoria del flujo de aire presurizado y un motor de vibración conectado a los medios de retención, en donde dichas válvulas y motor están conectados a un controlador con un generador de señal de software, configurado para controlar la abertura y el cierre de las válvulas dentro de la ruta del flujo de aire presurizado y para controlar la frecuencia de salida del motor de vibración en el filtro. En una realización particular y como ya se mencionó en este documento anteriormente, en una realización el motor de vibración está alineado con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro. En otra realización, el motor de vibración está alineado en ángulo recto con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro. En una realización preferida, hay al menos dos motores de vibración en los medios de retención, en particular motores de vibración neumáticos, en donde al menos uno de dichos motores de vibración está alineado con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro, y en donde al menos uno de los motores de vibración están alineados en ángulo recto con el eje longitudinal del elemento del cuerpo del filtro. En el contexto de la aplicación instantánea, los motores de vibración deben ser capaces de alcanzar altas frecuencias de vibración (al menos un par de cientos de Hertz) y tener una fuerza centrífuga suficiente (al menos 1900 Newton). Cualquier motor de vibración que cumpla con estas características es desplegable en el método de la presente invención. Preferentemente, los motores de vibración utilizados son neumáticos.

Ambas válvulas, dentro del flujo de aire presurizado, permiten controlar la dirección de la presión del aire en el filtro, en donde en la primera etapa una de las válvulas se cerrará, lo que generará una presión en el filtro en una dirección pero sin un flujo de aire real pasando por el filtro. En esta primera etapa, y mientras está bajo presión, el filtro está expuesto a una vibración a una frecuencia resonante estructural del filtro durante un tiempo suficiente para desalojar las partículas del filtro, como se usa en este documento, la frecuencia resonante estructural está en la primera frecuencia resonante, o a frecuencias armónicas a múltiples valores de la frecuencia principal del filtro. Las frecuencias principales de los filtros comienzan en 90 Hz hasta aproximadamente 110 Hz. Las frecuencias de vibración del motor de vibración comienzan igualmente en estos valores y hasta aproximadamente 1870 Hz. En una realización preferida, la frecuencia resonante estructural está en la primera o segunda frecuencia armónica de la frecuencia resonante principal. En una realización más preferida, la frecuencia de vibración está dentro del intervalo de 180 a 1870 Hz; aún más preferible dentro de un intervalo de frecuencia de 350 Hz a 1870 Hz; aún más en particular a una frecuencia de aproximadamente 1480 Hz. Por referencia a los ejemplos a continuación, en esta primera etapa, las frecuencias principales de los filtros comienzan en 90 Hz hasta aproximadamente 110 Hz, y consecuentemente las frecuencias de vibración del motor de vibración comienzan igualmente en aproximadamente 90 Hz y hasta aproximadamente 1870 Hz; aún más preferible en un intervalo de frecuencia de 350 Hz a 1870 Hz; incluso más en particular a una frecuencia de aproximadamente 1480 Hz. La presión dentro del filtro aumenta a presiones de aproximadamente 4,5 bar hasta aproximadamente 6 bar. Bajo estas condiciones de mayor presión y exposición a una frecuencia de resonancia estructural, las partículas se desalojan eficientemente del filtro, lo que representa un breve paso de la primera etapa en el método de la invención. Tiempos tan cortos como un par de minutos son suficientes en estas condiciones, por ejemplo, hasta 10 minutos, en particular hasta 5 minutos son suficientes en estas condiciones para desalojar las partículas del filtro. En una realización particular, en la primera etapa, el motor de vibración funciona, por ejemplo, a una frecuencia seleccionada de aproximadamente 350 Hz; desde aproximadamente 1480 Hz durante aproximadamente 5 minutos mientras el filtro se mantiene a una presión de 4,5 bar sin flujo de aire a través del filtro.

En una realización preferida, la presión aumenta en la dirección de la parte limpia (lado de escape) del filtro. En la segunda etapa, ambas válvulas se abren y se genera flujo de aire a través del filtro en la dirección opuesta a la presión en la primera etapa. La caída repentina de la presión mejora el flujo de aire a través del filtro con una eliminación rápida, casi instantánea y completa de las partículas sueltas del filtro. El flujo de aire presurizado en esta segunda etapa está en valores de hasta aproximadamente 2 bares, en particular a aproximadamente 1,5 bares durante aproximadamente 5 minutos, en particular hasta aproximadamente 2 minutos. Por referencia a los ejemplos a continuación, en una realización, el método de la presente invención se caracteriza además porque el filtro solo se expone a energía estructural resonante (vibraciones) durante la primera etapa del método de limpieza. El filtro no está expuesto a golpes o vibraciones durante la segunda etapa del método de limpieza. Expresado de manera diferente, después de que el filtro se haya sometido a presión y esté expuesto a una frecuencia de resonancia estructural, este último se detiene durante la segunda etapa en donde las partículas desalojadas se eliminan mediante un flujo de aire a través del filtro, en una dirección opuesta a la presión aplicada en la primera etapa. Sorprendentemente, la repentina caída de presión es en sí misma suficiente para que las partículas desalojadas se incluyan en el flujo de aire a través del filtro, hasta el punto de que el filtro es 'cuasi' regenerado completamente a su estado original en una sola ejecución.

En el sistema de la presente invención, el controlador para las válvulas y los medios de generación de vibración pueden funcionar en un esquema de circuito abierto o de circuito cerrado. En el sistema de circuito abierto de la figura 3, los valores de frecuencia deseados simplemente se establecen en el controlador dependiendo del filtro que se va a limpiar. El ajuste de las frecuencias deseadas puede ser realizado por el usuario a través de una interfaz de usuario, pero también podría seguir los adaptadores utilizados para montar un DPF dado en el sistema. En dicho caso, los adaptadores tienen puntos de reconocimiento que dependen de la dimensión que, en interacción con el resto del aparato de limpieza, permiten que el controlador reconozca las dimensiones del DPF presente y establezca los valores de frecuencia deseados para dicho DPF. En su forma más simple, estos puntos de reconocimiento que dependen de la dimensión podrían consistir de elementos de contacto presentes en el adaptador y confiables en las dimensiones de DPF serán únicos en su interacción con los elementos de contacto presentes en el resto del aparato de limpieza. Por lo tanto, en una realización adicional de la presente invención, el sistema comprende además puntos de reconocimiento dependientes de la dimensión DPF. En un esquema de circuito cerrado, los valores de frecuencia iniciales para un DPF dado se establecen de manera similar, pero en dicho caso el sistema comprende además un circuito de retroalimentación que ajusta continuamente la configuración de frecuencia del controlador con base en las mediciones de las frecuencias estructurales del filtro mientras es limpiado. En dicha realización, las frecuencias estructurales del filtro se miden determinando el nivel de vibración del filtro, tal como, por ejemplo, usando un acelerómetro (11) montado en el exterior del DPF. El número y la posición de los acelerómetros de ninguna manera están limitados y en la figura 4 se presenta una configuración de ejemplo. Los valores de los acelerómetros se retroalimentan al microcontrolador. Con esta retroalimentación, se puede encontrar la frecuencia óptima: variando la frecuencia sobre una banda de frecuencia alrededor de la resonancia esperada y determinando la excitación máxima. Esta frecuencia (estructural) encontrada se convertirá en la nueva frecuencia de conducción (estructural). Este método puede tener mejores resultados que el circuito abierto, ya que las propiedades resonantes pueden fluctuar un poco, debido al nivel de acumulación de cenizas y similares. Además, la señal de retroalimentación se puede utilizar para controlar el nivel de vibración para evitar daños o con fines de diagnóstico. Por consiguiente, un objeto de la presente invención es proporcionar un método para limpiar un filtro de partículas, incluyendo dicho método la medición del nivel de vibración del filtro. Por consiguiente, en otro aspecto, la presente invención proporciona un sistema para limpiar un filtro de partículas, comprendiendo dicho sistema medios para medir el nivel de vibración del filtro.

Por referencia a las realizaciones de ejemplo, el sistema de limpieza de la presente invención puede comprender además medios de recolección, tales como un receptáculo (9) de cenizas para las partículas que se liberan del filtro de partículas mientras se procesan.

La invención descrita en este documento e ilustrada con referencia a las realizaciones de las figuras 1 a 7, pero debe entenderse que las características de la invención son susceptibles de modificación, alteración, cambio o sustitución sin apartarse significativamente del espíritu de la invención. Por ejemplo, los tamaños y formas de los diversos elementos, como el tanque de aire presurizado, el conector flexible, el capó, la mesa, etc., pueden modificarse para adaptarse a aplicaciones específicas. Por consiguiente, las realizaciones específicas ilustradas y descritas en este documento son solo para fines ilustrativos y la invención no está limitada a las mismas excepto por las siguientes reivindicaciones.

Ejemplos

Medición de obstrucción del filtro

Primero, se midió la pérdida de presión a través de un nuevo filtro de partículas diésel, y se determinó como la presión diferencial o de reposo ($P_{\text{diafragma}}$) a la salida del flujo de aire presurizado. La medición se realizó a diferentes presiones de suministro (P_{entrada}). Además, hemos tomado sistemáticamente las presiones en ambas direcciones del flujo de aire. La dirección llamada "sentido normal" es la dirección convencional de flujo del gas de escape.

Se encontraron los siguientes valores (tabla 1):

P_{entrada} (mbar)	$P_{\text{diafragma}}$ (mbar)	
	Sentido normal	Sentido inverso
0	0	0
300	66	92
500	137	170
1000	350	409
1500	586	688
2000	867	990

Es notable que la presión diferencial en la dirección inversa "sentido inverso" es mucho mayor. Esto puede deberse a la geometría del filtro y/o del circuito de suministro.

5 Luego repetimos esta medición en un filtro sucio. No fue posible aumentar la presión de suministro hasta 2 bar, por lo que nos detuvimos a 1900 mbar.

Se encontraron los siguientes valores (tabla 2):

P_{entrada} (mbar)	$P_{\text{diafragma}}$ (mbar)	
	Sentido normal	Sentido inverso
0	0	0
300	74	78
500	138	156
1000	355	375
1500	585	614
1900	730	820

10 En la representación gráfica de las figuras 6 (sentido normal) y 7 (sentido inverso), interpolamos el valor a 1900 mbar para el nuevo filtro. En estos gráficos, podemos ver que la brecha entre el nuevo filtro y el filtro sucio comienza a marcar una presión de entrada de 1500 mbar (en reversa) y es significativa en ambas direcciones desde 1900 mbar.

Limpieza del filtro

Para limpiar el filtro, son necesarias dos acciones:

- Vibrar; y Soplar

15 La vibración desaloja las partículas del filtro y el soplado las evacua. No fue necesario soplar aire durante la fase de vibración.

Se aplicó el siguiente tratamiento:

1) vibración de 5 minutos a una presión de suministro de aire de 4,5 bares (frecuencia de motores de vibración = 350 Hz);

2) Soplado de 2 minutos, presión de suministro de aire entre 500 mbar y 1 bar DPF.

20 Después de limpiar, la presión diferencial del filtro se midió a una presión de suministro de 1900 mbar en ambos sentidos. Como se desprende de la tabla a continuación (tabla 3), el método de limpieza de acuerdo con la invención y simplemente se basa en un protocolo de dos etapas en donde en una primera fase el filtro se hace vibrar bajo presión pero sin soplar aire durante la fase de vibración, seguido de una fase de evacuación en donde las partículas desalojadas son sopladas fuera del filtro, es de hecho suficiente para devolver el filtro a su estado "nuevo". Finalmente,

25 el método de limpieza puede repetirse en un número de ciclos.

Tabla 3

	Sentido normal	Sentido inverso
FAP nuevo	813	939
FAP sucio	730	820
FAP limpio	815	915
P_{entrada} (mbars)		

Lista de características

- | | |
|--|--|
| 1 válvula de entrada | 12 válvula de acción rápida en el lado de escape |
| 2 tanque de aire presurizado | 13 rama del motor de vibración del manómetro |
| 3 válvula de acción rápida en el lado del motor | 14 rama de motor de vibración de válvula |
| 4 microcontrolador | 15 rama PF de válvula de abertura |
| 5 conector flexible | 16, 16' par de válvulas para controlar la orientación y la presión sobre el filtro |
| 6 capó | 17, 17' par de válvulas para controlar la orientación y la presión sobre el filtro |
| 7 filtro de partículas | 18 válvula de salida de medición |
| 8 mesa de elevación | 19 válvula de salida de evacuación |
| 9 receptáculo de cenizas | 20 manómetro después del filtro |
| 10 motor de vibración | 27 regulador de presión de tratamiento de aire |
| 11 acelerómetro | 28 medios de sellado en un extremo del PF |
| 21 manómetro antes del filtro | 29 medios de sellado en el otro extremo del PF |
| 22 unidad de tratamiento de aire | 100 compresor |
| 23 lubricador | 102 lado de escape |
| 24, 24' par de válvulas para controlar la orientación y la presión sobre el filtro | 103 lado de motor |
| 25, 25' de válvulas para controlar la orientación y la presión sobre el filtro | |
| 26 filtro de tratamiento de aire | |

REIVINDICACIONES

1. Un método de dos etapas para limpiar un filtro (7) de partículas que comprende dicho método;
 - una primera etapa que impone el filtro (7) de partículas a una frecuencia resonante estructural mientras está bajo presión de aire aumentada, en donde dicha presión de aire aumenta en la dirección de la parte limpia de dicho filtro; y
 - una segunda etapa que impone el filtro (7) de partículas a un flujo de aire en la dirección de la parte sucia de dicho filtro (7).
 caracterizada porque no hay flujo de aire a través del filtro (7) de partículas en la primera etapa, y la presión de aire en el filtro aumenta a una presión de aproximadamente y entre 4,5 bar a 6,0 bar.
2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde las frecuencias resonantes estructurales se imponen al filtro (7) por medio de un motor (10) de vibración, en particular un motor de vibración neumático.
3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en donde hay al menos dos motores (10) de vibración, en particular motores de vibración neumáticos, en donde al menos uno de dichos motores de vibración está alineado con el eje longitudinal del cuerpo del filtro (7), y en donde al menos uno de los motores (10) de vibración está alineado en ángulo recto con el eje longitudinal del cuerpo del filtro.
4. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 3, en donde los motores (10) de vibración vibran a una frecuencia de vibración en el intervalo de 90 a 1870 Hz; en particular a una frecuencia de 350 Hz.
5. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde el flujo de aire es un flujo de aire presurizado a valores de hasta aproximadamente 2 bar, en particular a aproximadamente 1,5 bar.
6. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde el filtro (7) de partículas es un filtro de partículas diésel (DPF) o un filtro de partículas de gasolina (GFP), más en particular un DPF de automóvil o un GFP de automóvil.
7. El método de acuerdo con la reivindicación 6, en donde el filtro (7) está orientado verticalmente con la parte sucia hacia abajo.
8. Un sistema para limpiar un filtro (7) de partículas, que funciona en un método de dos etapas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-7, comprendiendo dicho sistema;
 - medios (6, 8) de retención para soportar un filtro de partículas;
 - medios (10) de generación de vibraciones para imponer el filtro a una frecuencia resonante estructural durante la primera etapa del método de dos etapas
 - medios (1) de flujo de aire para generar una presión durante la primera etapa del método de dos etapas de la reivindicación 1 o un flujo de aire presurizado en dicho filtro (7) durante la segunda etapa del método de dos etapas;
 - medios (28, 29) de sellado para proporcionar un sello hermético en cualquier extremo del filtro (7); y en donde dicho sistema se caracteriza porque comprende dos pares de válvulas (16, 16' y 17, 17' o 24, 24' y 25, 25') de acción rápida en cada extremo del filtro de partículas, dichas válvulas se abre y/o cierra de este modo regulando tanto la orientación del flujo de aire como la presión dentro del filtro.
9. El sistema de acuerdo con la reivindicación 8, en donde los medios (10) de generación de vibración incluyen un motor de vibración conectado a los medios (6, 8) de retención.

Fig. 1

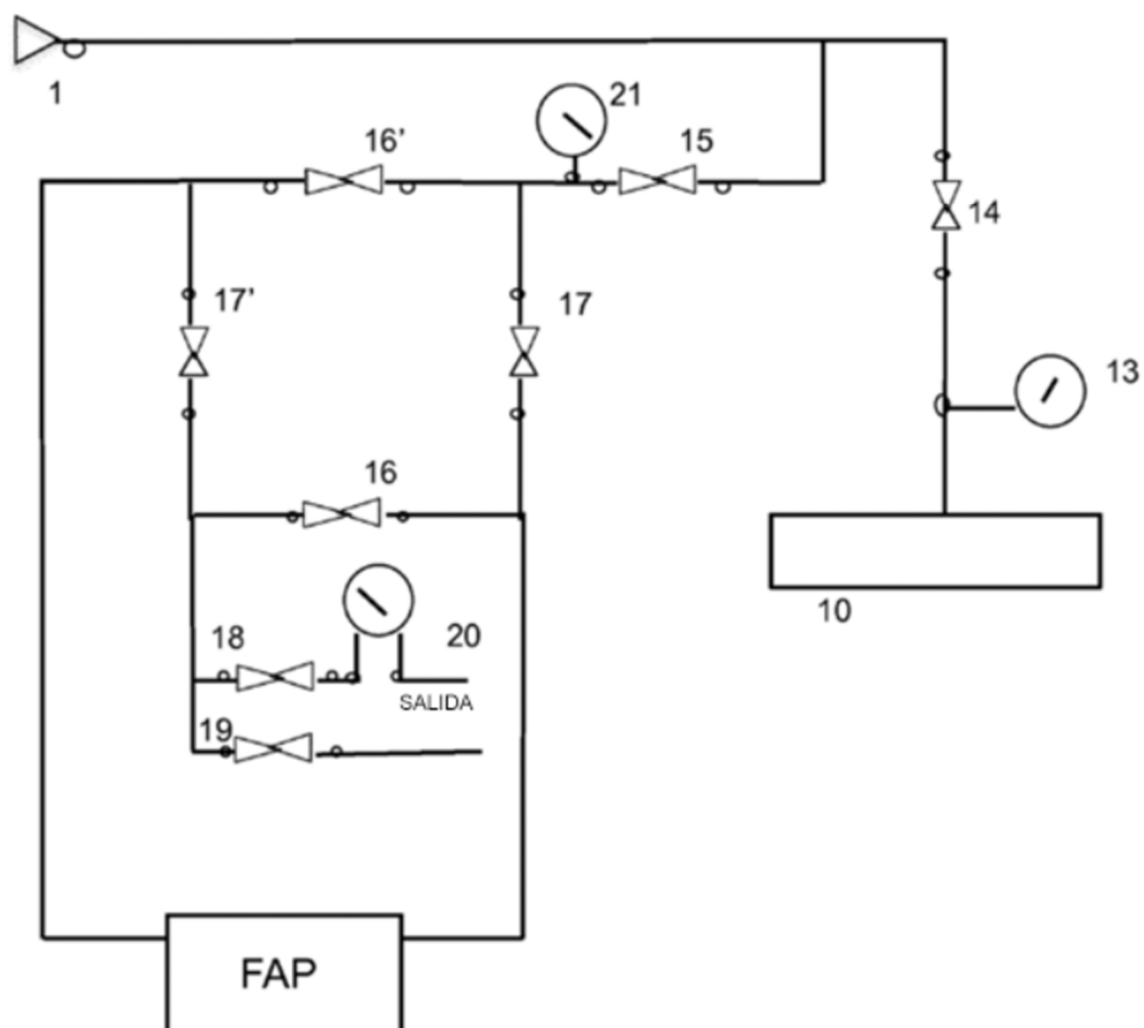


Fig. 2

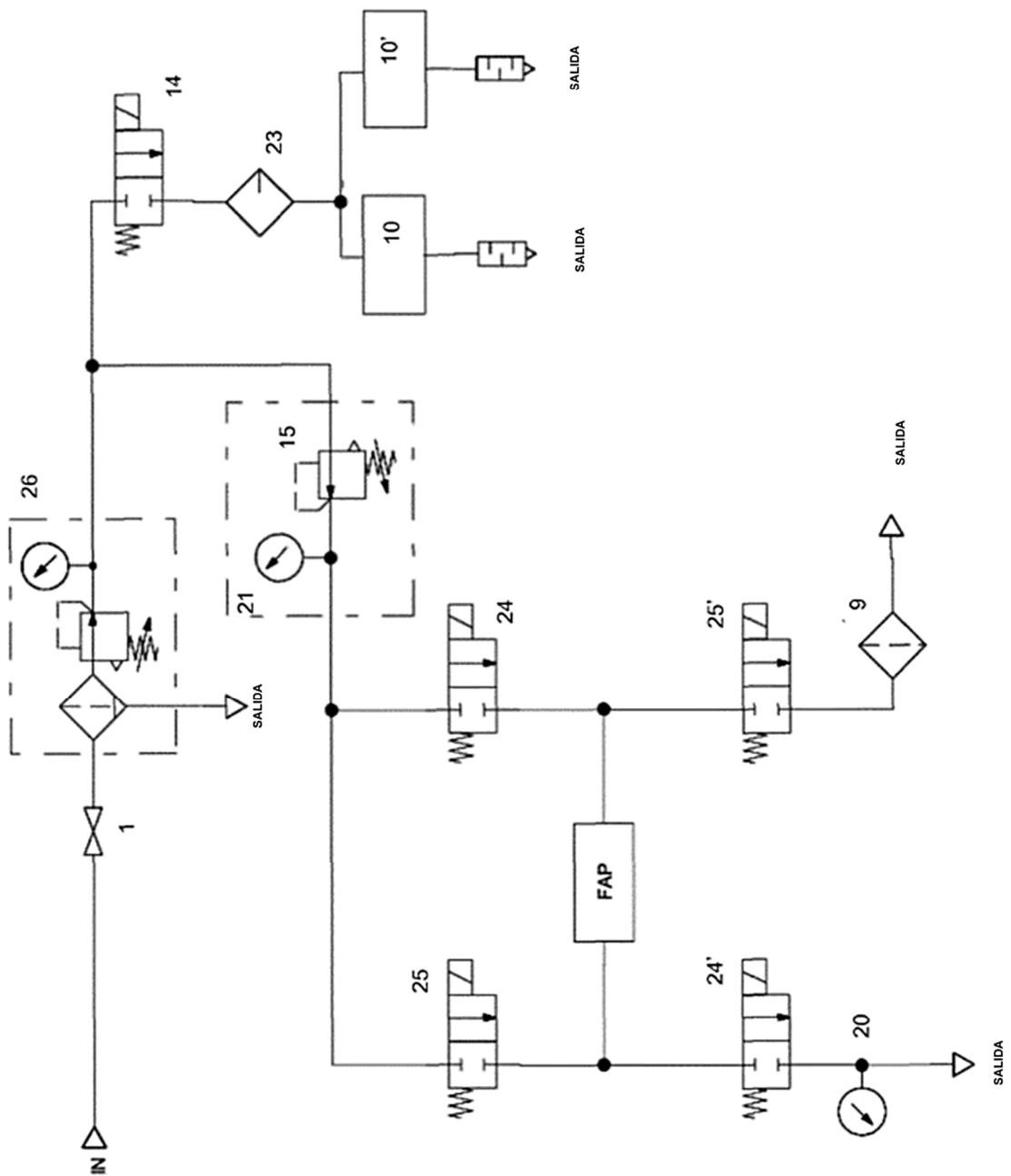


Fig. 3

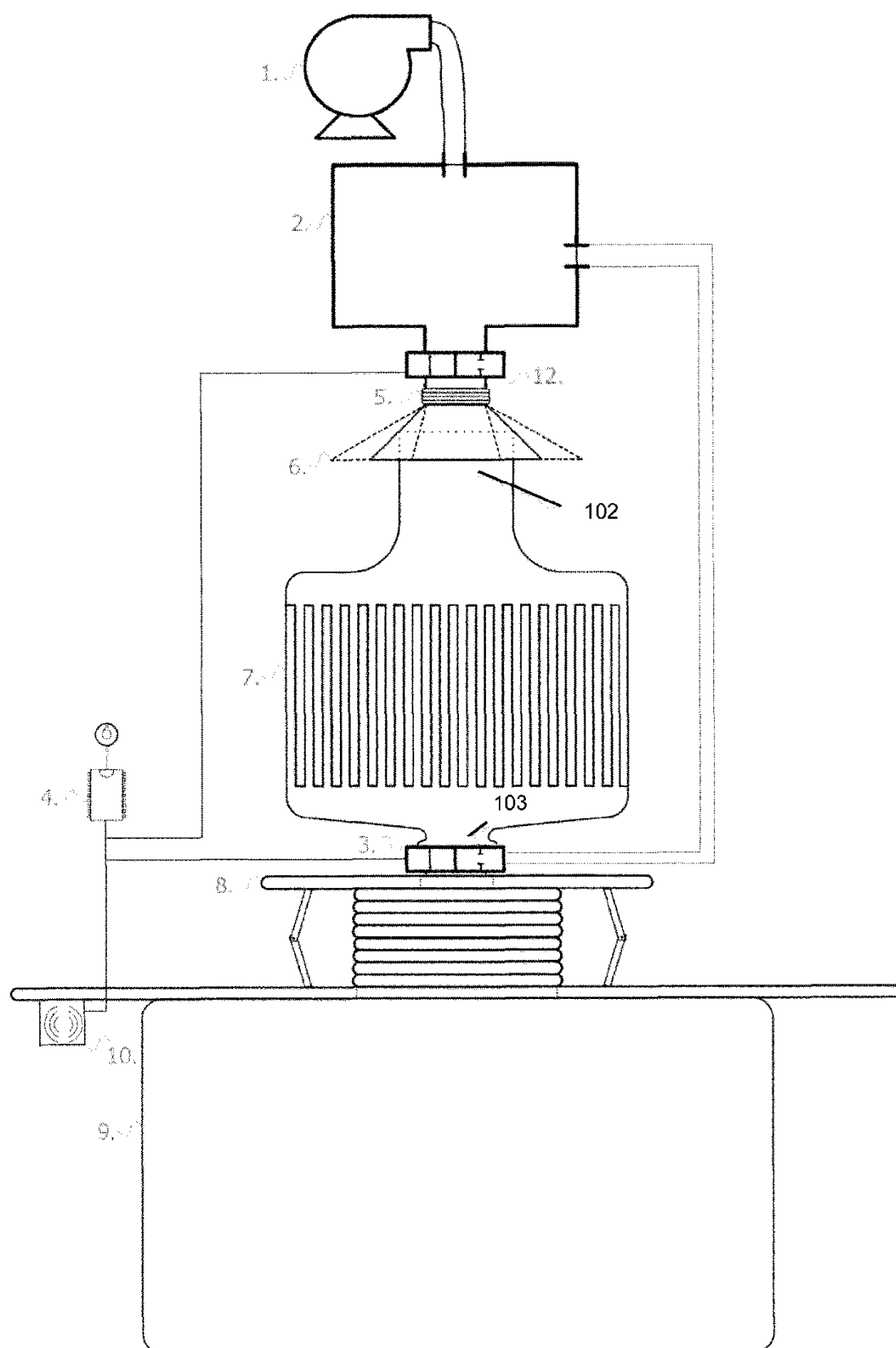


Fig. 4

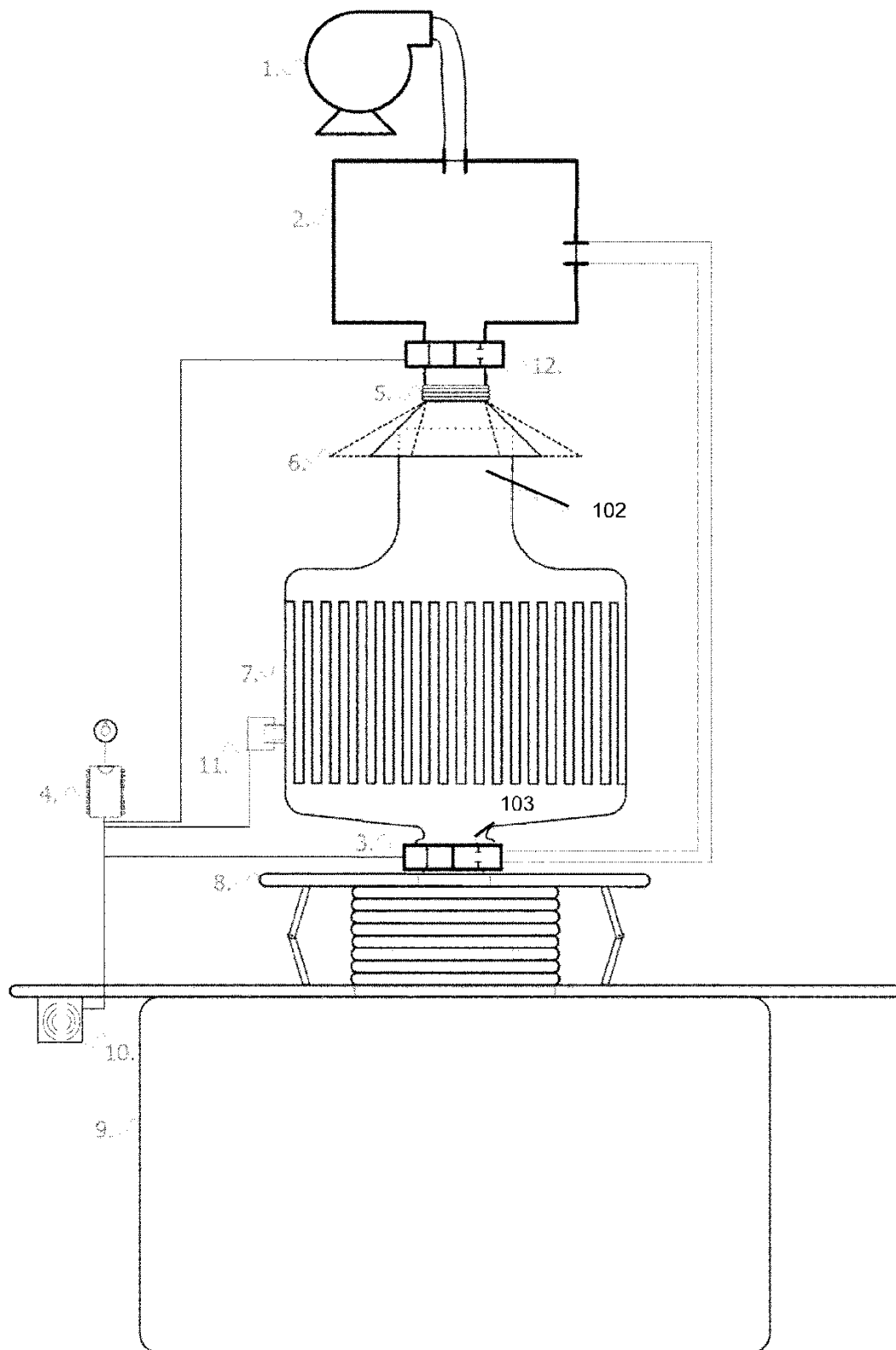


Fig. 5

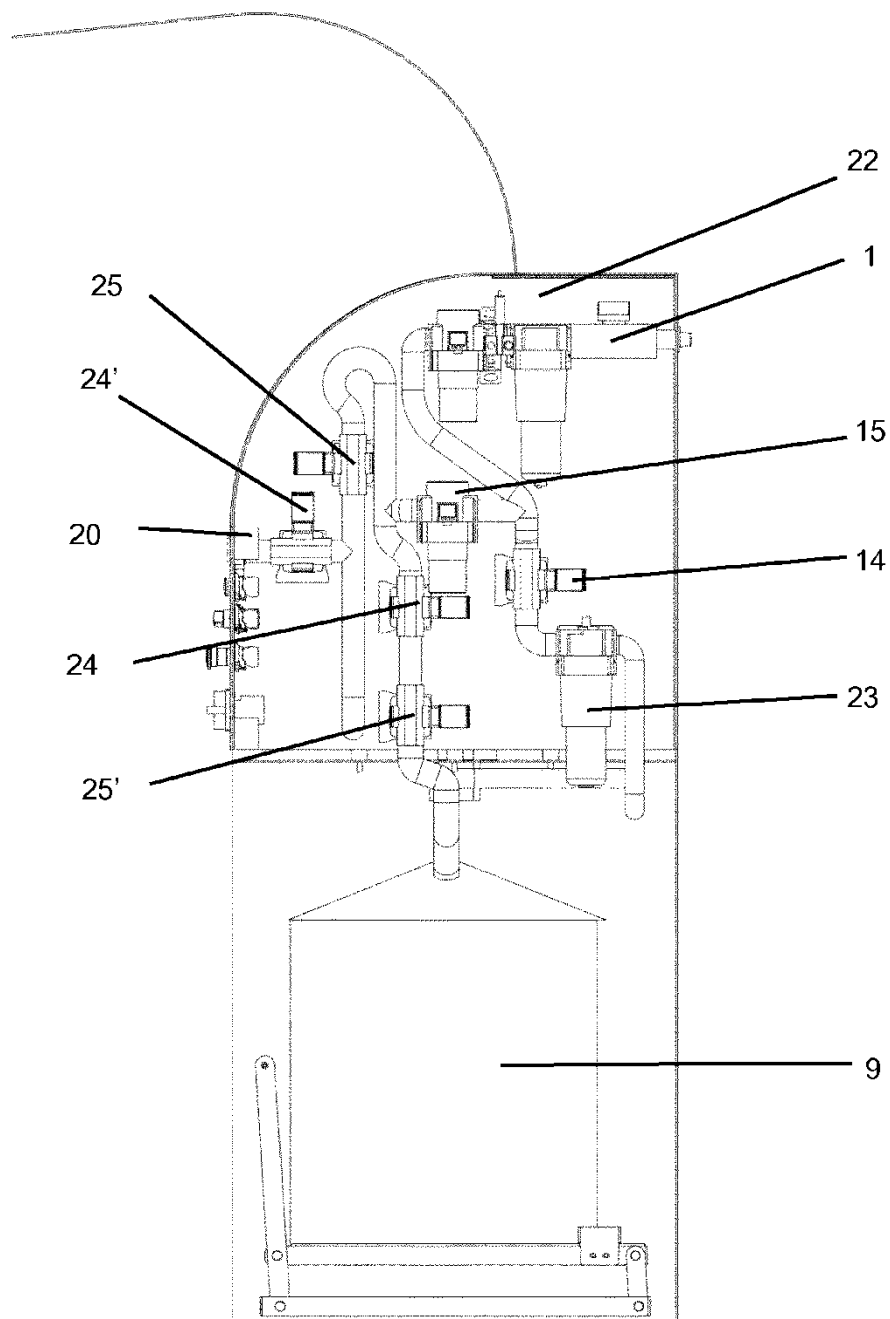


Fig. 6

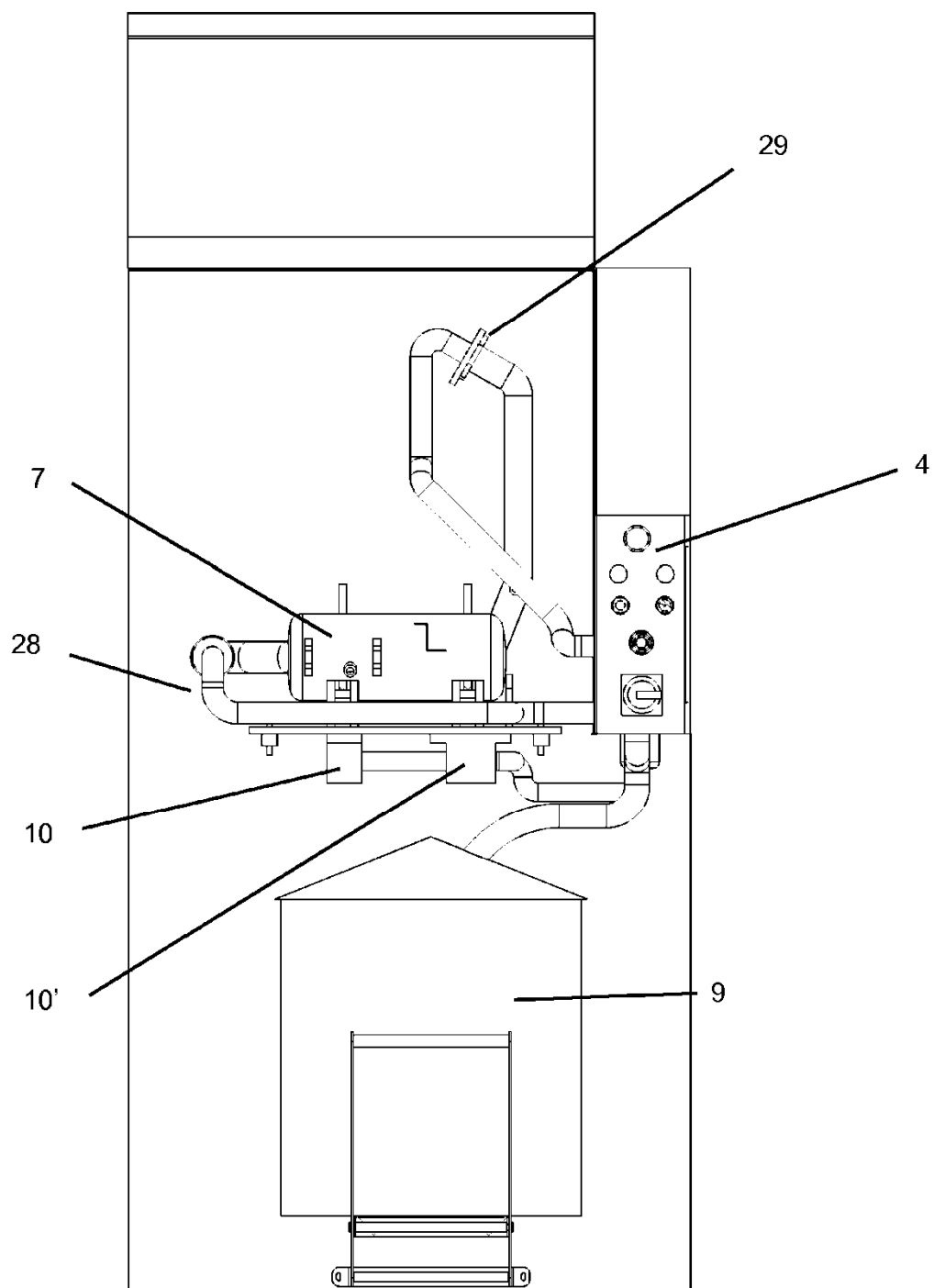


Fig. 7

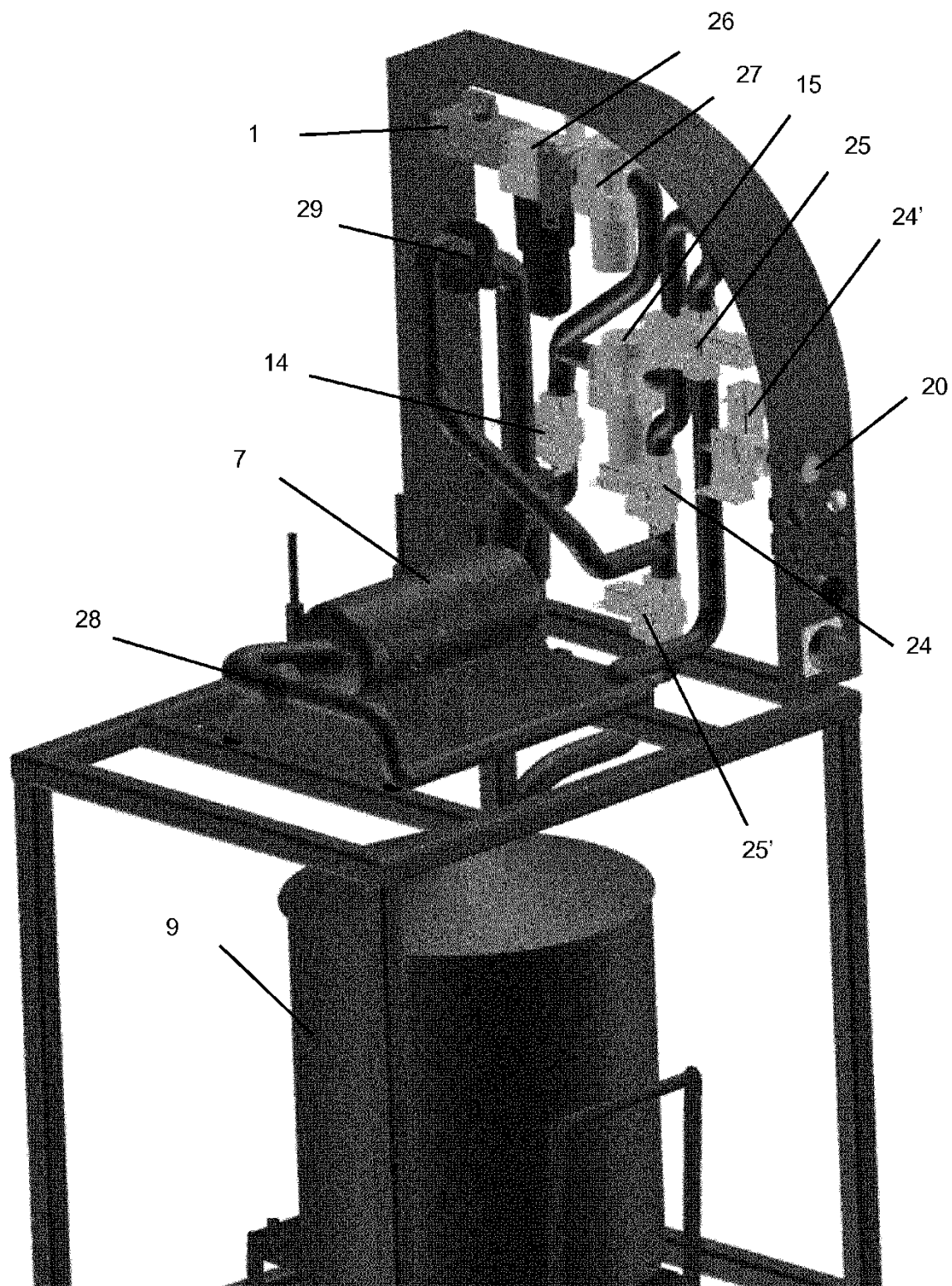


Fig. 8

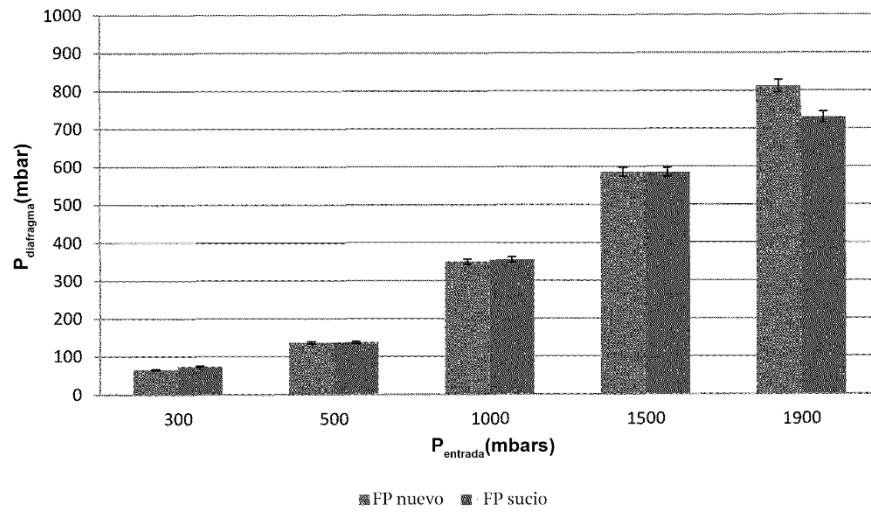


Fig. 9

