

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 009 703**

51 Int. Cl.:

B01D 21/26 (2006.01)

B01D 21/32 (2006.01)

B01L 3/00 (2006.01)

G01N 15/14 (2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.11.2020 PCT/US2020/062401**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.06.2021 WO21108692**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.11.2020 E 20828202 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2025 EP 4065251**

54 Título: **Sistemas y métodos de separación de partículas en fluidos**

30 Prioridad:

29.11.2019 US 201962942009 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
31.03.2025

73 Titular/es:

**DONALDSON COMPANY, INC. (100.00%)
1400 West 94th Street
Bloomington, MN 55431, US**

72 Inventor/es:

**MORAVEC, DAVIS B.;
QUAM, DARYL L.;
DALLAS, ANDREW J.;
YODER, MIKAYLA A. y
LAUER, DAVID D.**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 3 009 703 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

Sistemas y métodos de separación de partículas en fluidos

5 La presente divulgación se refiere a la separación de partículas. En particular, la presente divulgación se refiere a la separación de partículas en fluidos.

10 Las partículas dispersas en el fluido pueden ser problemáticas en determinados sistemas, tales como los sistemas de combustible de los motores, sistemas de combustible a granel, sistemas hidráulicos u otros sistemas de manipulación o almacenamiento de fluidos. Por ejemplo, las partículas de agua (o gotas de agua) en el combustible pueden ser problemáticas en los sistemas de combustible de los motores de combustión interna. El agua en el combustible puede dañar los inyectores de combustible debido a la corrosión o vaporización durante la combustión. Los daños en los inyectores pueden causar diversos problemas en el funcionamiento del motor, tal como no poder cumplir las normas de emisión jurisdiccionales. Los daños en el inyector de combustible pueden requerir reparación o mantenimiento. La reducción del tiempo de funcionamiento puede ser particularmente costosa para los vehículos comerciales o industriales. En general, la presencia de gases, líquido o partículas sólidas dispersas en el fluido pueden causar problemas en diversos sistemas de fluidos, tales como los sistemas de combustible a granel, sistemas hidráulicos, etc. Los filtros de fluidos tradicionales capturan las partículas en una estructura de medios. La estructura del medio filtrante puede obstruirse con el tiempo y requerir mantenimiento o la sustitución del filtro.

20 El documento US 2011/096327 A1 divulga un separador que incluye una entrada para recibir una solución que contiene partículas, al menos dos salidas, y un canal en espiral dispuesto en bucles. El separador aprovecha el fenómeno de la migración inercial para separar partículas dentro de un canal en espiral en múltiples corrientes de partículas.

25 **Sumario**

30 Un sistema para separar partículas en fluidos se divulga en las reivindicaciones 1-7 y un sistema de combustible se divulga en la reivindicación 8.

35 Las técnicas de la presente divulgación se refieren en general a la concentración de determinadas partículas en un fluido en diversos sistemas de fluidos y a la separación de esas determinadas partículas del fluido o de partículas de otros tamaños. En general, los sistemas de fluidos pueden incluir elementos de separación de partículas, tales como elementos de separación hidrodinámica, para concentrar partículas en un intervalo de tamaño concreto. El elemento de separación de partículas puede incluir una entrada y una salida que tiene al menos dos ramales de flujo. Las partículas del intervalo de tamaño particular pueden concentrarse en uno de los dos ramales de flujo. En algunas realizaciones, las partículas que superan un umbral de tamaño se concentran en uno de los dos ramales de flujo. Cualquiera de las partículas restantes puede fluir a través de al menos dos ramales de flujo. En algunas realizaciones, el elemento separador de partículas puede utilizarse para complementar o sustituir un filtro de fluidos.

40 **Breve descripción de los dibujos**

En los dibujos se ilustran diversas realizaciones de la divulgación, que se resumen a continuación:

45 La **Figura 1** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido que incluye un elemento de separación de partículas configurado para recibir un flujo de fluido desde una fuente de fluido de acuerdo con la presente divulgación.

50 La **Figura 2** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de sistema de fluido que puede usarse para manipular combustible en máquina que puede utilizarse con el elemento de separación de partículas de la **Figura 1**.

55 La **Figura 3** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de sistema de fluidos que puede utilizarse para manipular combustible a granel que puede utilizarse con el elemento de separación de partículas de la **Figura 1**.

La **Figura 4** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido que puede utilizarse para suministrar fluido hidráulico que puede utilizarse con el elemento de separación de partículas de la **Figura 1**.

60 La **Figura 5** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido que puede utilizarse para desairear fluido hidráulico que puede utilizarse con el elemento de separación de partículas de la **Figura 1**.

La **Figura 6** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sensor de partículas óptico o basado en la luz que puede utilizarse en el sensor de partículas de la **Figura 1**.

65 La **Figura 7** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de una disposición para usar el sensor de partículas de la **Figura 1** en relación con un canal microfluídico.

La **Figura 8** es un diagrama conceptual que muestra otro ejemplo de una disposición para usar el sensor de partículas de la **Figura 1** en relación con un canal microfluídico.

5 Las **Figuras 9-10** son diagramas conceptuales que muestran otra disposición para usar el sensor de partículas de la **Figura 1** con un elemento de separación de partículas y un elemento sensor microfluídico.

10 Las **Figuras 11A-B** son diagramas conceptuales que muestran un ejemplo de una técnica para contar el número de partículas en múltiples canales microfluídicos utilizando un detector de luz compartido que puede utilizarse con el sensor de partículas de la **Figura 1**.

La **Figura 12** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido que puede usarse para eliminar partículas que puede utilizarse con el elemento de separación de partículas de la **Figura 1**.

15 Las **Figuras 13A-D** son imágenes y gráficos que muestran el dispositivo separador hidrodinámico y la intensidad del píxel frente a la posición de canal, respectivamente.

20 La **Figura 14** es un diagrama conceptual que muestra posiciones relativas de ángulos alrededor de un dispositivo separador hidrodinámico de las **Figuras 13A-D**.

La **Figura 15** es un gráfico que muestra el porcentaje concentrado frente a la longitud de canal para un dispositivo separador hidrodinámico de las **Figuras 13A-D**.

25 Descripción detallada

En la siguiente descripción detallada, se hace referencia a varias realizaciones específicas. Debe entenderse que se contemplan y pueden realizarse otras realizaciones sin desviarse del alcance o espíritu de la presente divulgación. La siguiente descripción detallada, por lo tanto, no debe entenderse en sentido restrictivo.

30 Esta divulgación proporciona técnicas para concentrar ciertas partículas en fluido en varios sistemas de fluidos y para separar esas ciertas partículas del fluido o de partículas de otros tamaños. En general, los sistemas de fluidos pueden incluir elementos de separación de partículas, tales como elementos de separación hidrodinámica, para concentrar partículas en un intervalo de tamaño concreto. El elemento de separación de partículas puede incluir una entrada y una salida que tiene al menos dos ramales de flujo. Las partículas del intervalo de tamaño particular pueden concentrarse en uno de los dos ramales de flujo. En algunas realizaciones, las partículas que superan un umbral de tamaño se concentran en uno de los dos ramales de flujo. Cualquiera de las partículas restantes puede fluir a través de al menos dos ramales de flujo. En algunas realizaciones, el elemento separador de partículas puede utilizarse para complementar o sustituir un filtro de fluidos.

40 Los elementos de separación de partículas, que pueden incluir elementos hidrodinámicos de separación, pueden usarse como sustitutos o suplementos de los filtros. En particular, los elementos de separación de partículas pueden utilizarse para concentrar partículas por encima de un tamaño crítico en una porción de un flujo de fluido. Esta parte del flujo de fluido puede retirarse del sistema, eliminando así la mayoría de las partículas que superan un tamaño umbral. En algunos casos, esto puede sustituir algunas o todas las funciones de un filtro. Es posible que el rendimiento de los elementos de separación de partículas no varíe con el tiempo y que no sea necesario sustituirlos periódicamente. En algunas realizaciones, puede utilizarse un filtro a continuación del elemento de separación de partículas para eliminar las partículas inferiores al tamaño umbral. Además, en algunas realizaciones, se filtran las partículas concentradas por el elemento de separación de partículas. Esto puede hacerse a una velocidad frontal más baja que en un sistema sin un elemento de separación de partículas, y por tanto conducir a una menor caída de presión del filtro y una mayor vida útil del filtro.

55 Los elementos de separación de partículas, que pueden incluir elementos hidrodinámicos de separación, también pueden usarse para clasificar partículas de distintos tamaños. En algunas aplicaciones, puede determinarse un tamaño de umbral. El elemento de separación de partículas puede estar diseñado para concentrar partículas por encima del tamaño umbral en una porción de fluido concentrado de un flujo de fluido. La porción concentrada del flujo de fluido puede extraerse del sistema. Esta técnica puede usarse para concentrar partículas para el recuento de partículas. Esta técnica también puede utilizarse para separar distintos tipos de partículas o concentrar determinados materiales para su recogida.

60 Un sensor microfluídico de partículas, o elemento sensor microfluídico, puede usarse para detectar contaminantes individuales en un fluido, tal como una corriente líquida. Puede colocarse un separador o una etapa de segmentación aguas arriba del sensor de partículas. La etapa de segmentación, o elemento de separación de partículas, puede separar las partículas en diferentes líneas de flujo de fluido basándose en el tamaño de las partículas. Esto se podría conseguir, por ejemplo, con Separación de Flujo Dean. Una vez que las partículas se encuentran en líneas de corriente basándose en su tamaño, las líneas de corriente se envían a diferentes canales sensores de un elemento sensor microfluídico. Los canales de detección están asociados a sensores de partículas que cuentan el número de partículas.

Al conocer el número de partículas en cada canal de detección se puede determinar una distribución aproximada del tamaño de las partículas. El sensor puede ser un sensor óptico, sensor de capacitancia, sensor magnético u otro sensor. Como alternativa, el sensor de partículas puede contener sólo un canal microfluídico y un sensor. El uso del canal microfluídico puede aumentar la sensibilidad para contaminantes individuales en relación con otras técnicas, tal como la dispersión de Mie. El procesamiento de señales también puede usarse para identificar el tipo de contaminante.

Además, los elementos de separación de partículas, que pueden incluir elementos hidrodinámicos de separación, pueden usarse para la eliminación selectiva de residuos de partículas. En algunos casos, sólo las partículas por encima de un determinado tamaño pueden ser objeto de eliminación de un sistema. Los usos para la eliminación selectiva de residuos de partículas pueden incluir, pero no se limitan, a: la eliminación o concentración de las grasas en la leche (las grasas son normalmente aglomerados de 0,1 a 15 micrómetros), la eliminación o concentración de la pasta de zumo de naranja, la eliminación de contaminantes en fluidos de procesamiento de semiconductores, y la eliminación de aglomerados de tinta en el procesamiento industrial de tintas. En un ejemplo se refiere a lodos de pulido de obleas, los elementos de separación de partículas pueden estar diseñados para eliminar partículas por encima de un tamaño umbral, que pueden ser aglomerados o impurezas, dejando pasar las partículas por debajo del tamaño umbral.

Definiciones

Partícula

Como se utiliza en el presente documento, el término "partícula" se refiere a una cantidad discreta de material, que puede estar disperso en un fluido diferente. Ejemplos no limitativos de material que pueden ser partículas formadas incluyen suciedad, metal, burbujas de aire y gotas de agua. En un ejemplo en particular, las gotas de agua pueden dispersarse en un fluido de hidrocarburos, tal como la gasolina o el gasóleo, para formar una emulsión. En otro ejemplo, las burbujas de aire pueden dispersarse en un fluido hidráulico.

Aguas arriba/aguas abajo

Como se utiliza en el presente documento, la expresión "aguas abajo" se refiere a una dirección a lo largo de un flujo de fluido. La expresión "aguas arriba" se refiere a lo contrario de aguas abajo, o a una dirección opuesta al flujo del fluido.

Canal microfluídico

Como se utiliza en el presente documento, la expresión "canal microfluídico" se refiere a un canal que tiene al menos una dimensión inferior a 1 milímetro (1000 micrómetros). Un canal microfluídico puede tener una anchura inferior a 1000 micrómetros, una altura (o profundidad) del canal inferior a 1000 micrómetros, o ambas cosas. En algunas realizaciones, para aplicaciones de mayor caudal, al menos una dimensión del canal microfluídico puede ser superior a 1 milímetro. En algunas realizaciones, al menos una dimensión del canal microfluídico es superior que o igual a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, o 10 milímetros o inferior que o igual a 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, o 2 milímetros. En general, el canal puede tener cualquier longitud adecuada para proporcionar una caída de presión adecuada equilibrada con un concentración de partículas adecuado.

Los canales microfluídicos pueden describirse mediante un área de sección transversal, *anchura* × *altura*. En algunas realizaciones, el área de la sección transversal del canal microfluídico puede ser inferior a 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3 o 2 milímetros cuadrados.

Los canales microfluídicos también pueden describirse mediante un diámetro hidráulico. Para un canal microfluídico que tiene una sección transversal rectangular, por ejemplo, el diámetro hidráulico puede calcularse como:

$$D_H = \frac{2 \times \text{altura} \times \text{anchura}}{\text{altura} + \text{anchura}} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde D_H es el diámetro hidráulico. Pueden calcularse otras formas transversales según técnicas conocidas por un experto habitual en la materia que tenga la ventaja de la presente divulgación. En algunas realizaciones, el diámetro hidráulico del canal microfluídico puede ser inferior a 5, 4, 3, 2 o 1 milímetro. En al menos una realización, el diámetro hidráulico del canal microfluídico del canal microfluídico puede ser inferior a 1 milímetro.

Separador hidrodinámico

Como se utiliza en el presente documento, la expresión "separador hidrodinámico" se refiere a un canal de fluido curvado que incluye, al menos, una entrada para recibir un flujo de fluido y una salida que incluye al menos dos ramificaciones para dividir el flujo de fluido. El canal de fluido puede ser un canal microfluídico. La entrada puede recibir un fluido que puede contener partículas de varios tamaños. A un caudal particular, el separador hidrodinámico está configurado para centrar en uno de los ramales cualquiera de las partículas que superen un tamaño umbral. Las partículas restantes no se concentran en el flujo de fluido. Las partículas restantes pueden repartirse entre todos los

ramales, por ejemplo, basándose en fracciones de volumen, o relaciones de caudal de salida, asociados a cada ramal. Los separadores hidrodinámicos pueden diseñarse basándose en al menos uno o más de los siguientes parámetros: un número de Dean, un número de Reynolds, un diámetro hidráulico, un radio de curvatura, un caudal objetivo, caída de presión objetivo, tamaño crítico de las partículas, viscosidad del fluido, temperatura de funcionamiento (que puede afectar a la viscosidad del fluido), una relación de caudales de salida, o cualquier combinación de las mismas. Los separadores hidrodinámicos también pueden describirse como separadores de flujo Dean.

En general, los separadores hidrodinámicos incluyen canales microfluídicos curvos diseñados para concentrar las partículas que superan un tamaño umbral en la pared interior de la curva. El área de sección transversal del canal microfluídico limita el tamaño máximo de partícula que puede entrar en el canal microfluídico. El dispositivo define una geometría (tal como la anchura, altura, radio de curvatura y longitud de canal) diseñada para concentrar partículas en un fluido conocido a un caudal específico o en un intervalo de caudal. Las partículas concentradas cerca de la pared interior pueden eliminarse a continuación del sistema extrayendo una parte del fluido cerca de la pared interior. En otras realizaciones, en función de la geometría del dispositivo y de las condiciones de funcionamiento, las partículas y el flujo de residuos pueden concentrarse alternativamente cerca de la pared exterior. El diseño del dispositivo puede depender del caudal de aplicación, propiedades del fluido (tales como viscosidad y densidad), y tamaño umbral de las partículas. El separador hidrodinámico puede actuar como filtro o como prefiltro en un sistema.

Los canales microfluídicos curvos pueden utilizarse para concentrar partículas de un tamaño predeterminado en condiciones de flujo adecuadas. En un canal o tubo curvo en condiciones de flujo laminar, la inercia del fluido crea un gradiente de presión a través del canal. Para aliviar el gradiente de presión, pueden formarse dos flujos en espiral conocidos como flujos de Dean (a veces denominados flujos secundarios). El flujo de Dean puede presentar arrastre sobre cualquier partícula del fluido. En canales más grandes, las partículas pueden ser arrastradas a lo largo del canal en un movimiento en espiral. Cuando los canales se hacen más pequeños, tal como en los canales microfluídicos, el flujo de Dean puede equilibrarse con dos fuerzas adicionales de tal manera que las partículas pueden quedar atrapadas y concentrarse en la pared interior del canal curvo. Estas fuerzas pueden describirse como la fuerza de sustentación inducida por el cizallamiento, que provoca una fuerza de sustentación hacia la pared, y la fuerza de sustentación inducida por la pared que empuja la partícula lejos de la pared debido a la limitación del flujo de fluido a medida que la partícula se acerca a la pared. Las partículas pueden concentrarse en una línea de corriente específica dentro del canal curvo. Concentrar las partículas de esta manera puede denominarse separación hidrodinámica o separación de flujo de Dean.

Elemento de enrutamiento de flujo

Como se utiliza en el presente documento, un "elemento de enrutamiento de flujo" se refiere a un componente configurado para permitir el enrutamiento selectivo de un flujo de fluido que sale de un canal de fluido. Ejemplos no limitativos de componentes de un elemento de enrutamiento de flujo incluyen una válvula o un solenoide. En un ejemplo, un elemento de enrutamiento de flujo puede incluir una o más válvulas configuradas para desviar el flujo a uno o más ramales de cualquier manera adecuada.

Número de Dean

El número de Dean describe el comportamiento del fluido en una tubería curva y tiene en cuenta las fuerzas de inercia, fuerzas centrípetas y fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido. En diversas realizaciones, el sistema está configurado para tener un número de Dean entre 5 y 25. El número de Dean se define como:

$$De = Re \sqrt{\frac{D_H}{2R_c}} \tag{Ec. 2}$$

donde Re es el número de Reynolds y Rc es el radio de curvatura del canal de fluido.

Número de Reynolds

El número de Reynolds describe la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, y se define como:

$$Re = \frac{\rho U D_H}{\mu} \tag{Ec. 3}$$

donde ρ es la densidad del fluido, U es la velocidad media del fluido, y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

A continuación, se hará referencia a los dibujos, que representan uno o más aspectos descritos en esta divulgación. Sin embargo, se entenderá que otros aspectos no representados en los dibujos entran dentro del ámbito de la presente divulgación. Los números similares utilizados en las figuras se refieren a componentes, etapas iguales, y similares. Sin embargo, se entenderá que el uso de un carácter de referencia para referirse a un elemento en una figura dada no está previsto para limitar el elemento en otra figura etiquetada con el mismo carácter de referencia. De forma adicional, el uso de caracteres de referencia diferentes para referirse a elementos de figuras diferentes no está previsto

para indicar que los elementos referenciados de forma diferente no puedan ser iguales o similares.

La **Figura 1** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido **100** que incluye un elemento de separación de partículas **102** configurado para recibir un flujo de fluido desde una fuente de fluido **104**. El sistema de fluidos **100** puede ser cualquier tipo adecuado de sistema que pueda beneficiarse de usar el elemento de separación de partículas **102**, tal como el sistema de combustible de un motor, un sistema de combustible a granel, o un sistema hidráulico. La fuente de fluido **104** puede estar configurada para contener un fluido, que pueden contener partículas. El elemento de separación de partículas **102** puede usarse como filtro para facilitar la eliminación de partículas en un intervalo de tamaño particular del fluido. Por ejemplo, se pueden eliminar las partículas consideradas contaminantes o residuos. Adicionalmente, o como alternativa, el elemento de separación de partículas **102** puede utilizarse para facilitar la clasificación de partículas de diferentes tamaños. La clasificación de partículas de diferentes tamaños puede permitir al sistema de fluidos **100** determinar cuántas partículas se encuentran dentro de diferentes intervalos de tamaño.

El elemento de separación de partículas **102** puede estar acoplado fluidamente entre la fuente de fluido **104** y un destino de fluido, tal como destinos opcionales de fluidos **106**, **108**. El elemento de separación de partículas **102** puede estar situado aguas abajo de la fuente de fluido **104**. El elemento de separación de partículas **102** puede estar situado aguas arriba de los destinos de fluido **106**, **108**. El destino de fluido **106** puede ser un componente del sistema de fluido **100** que almacena, usa o consume, el fluido, tal como el combustible que consume un motor. El destino de fluido **108** puede ser un componente del sistema de fluido **100** que utiliza el fluido y lo devuelve a la fuente de fluido **104**, tal como un fluido hidráulico usado en un pistón hidráulico. El elemento de separación de partículas **102** puede eliminar partículas en un intervalo de tamaño particular del fluido antes de proporcionar el fluido a uno de los destinos de fluido **106**, **108**.

El elemento de separación de partículas **102** puede incluir cualquier componente adecuado que puede utilizarse para eliminar partículas o clasificar partículas en el fluido. En algunas realizaciones, el elemento de separación de partículas **102** incluye un elemento de separación hidrodinámico. En general, el elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir el elemento de separación hidrodinámica, puede no cargarse de partículas y puede no modificar su rendimiento con el paso del tiempo o requerir una sustitución periódica.

El elemento de separación hidrodinámica puede incluir uno o más separadores hidrodinámicos. En algunas realizaciones, los separadores hidrodinámicos están dispuestos en paralelo. La longitud de canal y la disposición de los separadores hidrodinámicos pueden diseñarse para proporcionar las caídas de presión deseadas.

En algunas realizaciones, el elemento de separación de partículas **102** incluye un elemento de enrutamiento de flujo. El elemento de enrutamiento de flujo puede estar dispuesto en la salida del elemento de separación de partículas **102**. El elemento de enrutamiento de flujo puede incluir uno o más válvulas o solenoides para desviar el flujo de fluido.

En general, el elemento de separación de partículas **102** incluye una salida que tiene al menos dos ramales diferentes. El flujo de fluido puede dividirse entre los distintos ramales. En algunas realizaciones, usando el elemento de separación hidrodinámico, todas las partículas en particular en el intervalo de tamaño pueden concentrarse en uno de los ramales. Cada ramal puede estar asociado a partículas de distintos intervalos de tamaño (véanse **Figuras 9-10**).

Cada ramal puede estar dirigido a, o en comunicación fluida con, un destino fluido diferente. En algunas realizaciones, un ramal puede dirigirse al destino de fluido **106** y otro ramal puede dirigirse al destino de fluido **108**.

Puede usarse una bomba de fluido **114** para controlar un caudal de fluido a través del elemento de separación de partículas **102**. La bomba de fluido **114** puede colocarse en cualquier ubicación adecuada en relación con el elemento de separación de partículas **102** para facilitar el control del caudal, tal como aguas arriba, aguas abajo, o integrado con el elemento de separación de partículas. En la realización ilustrada, la bomba de fluido **114** está situada aguas arriba del elemento de separación de partículas **102**.

Puede usarse un sensor de partículas **112** para detectar cualquier partícula en el flujo de fluido. El sensor de partículas **112** puede colocarse en cualquier ubicación adecuada en relación con el elemento de separación de partículas **102** para facilitar la detección de determinadas partículas, tal como aguas arriba, aguas abajo, o integrado con el elemento de separación de partículas. En algunas realizaciones, el sensor de partículas **112** puede estar situado entre la entrada y la salida del elemento de separación de partículas **102**. El sensor de partículas **112** puede usar cualquier tipo adecuado de mecanismo para detectar partículas en el fluido. Por ejemplo, el sensor de partículas **112** puede incluir o ser un sensor de partículas basado en la luz **200** (**Figura 6**) o un sensor basado en capacitancia.

Puede usarse un elemento sensor microfluídico **116** para detectar partículas de diferentes tamaños desde uno o más de los ramales del elemento de separación de partículas **102**. El elemento sensor microfluídico **116** se muestra posicionado aguas abajo del elemento separador de partículas **102**. En algunas realizaciones, puede describirse que el elemento sensor microfluídico **116** forma parte del elemento separador de partículas **102**. El elemento sensor microfluídico **116** puede incluir uno o más canales sensores microfluídicos. En algunas realizaciones, los canales de detección microfluídicos están dispuestos en paralelo. La longitud y la disposición de los canales de detección

microfluídicos pueden diseñarse para proporcionar las caídas de presión y la concentración de partículas deseados.

Cada canal microfluídico puede estar acoplado fluidamente a uno de los ramales del elemento de separación de partículas **102**. El elemento sensor microfluídico **116** puede incluir también uno o más sensores de partículas **112** para detectar diferentes tamaños de partículas que han sido clasificadas por el elemento de separación de partículas **102**. El elemento sensor microfluídico **116** puede usarse también para determinar si el elemento de separación de partículas **102** ha eliminado con éxito algunas o todas las partículas en un intervalo de tamaño particular. El elemento sensor microfluídico **116** puede incluir también un elemento de enrutamiento de flujo. El elemento de enrutamiento de flujo puede utilizarse para facilitar la eliminación de partículas en un intervalo de tamaño particular.

Puede definirse un subsistema de fluidos **120** que puede incluir uno o más de los siguientes elementos: el elemento de separación de partículas **102**, la bomba de fluido **114**, el elemento sensor microfluídico **116**, y un controlador **110**. El controlador **110** puede utilizarse para facilitar diversas funcionalidades del subsistema de fluidos **120** descrito en el presente documento.

Se contemplan varias configuraciones del sistema de fluidos **100**. En el presente documento se muestran y describen con más detalle ejemplos no limitativos de otras configuraciones y diversos componentes del sistema de fluidos **100**.

En un ejemplo, que puede describirse como un filtro de bucle renal (no mostrado), la bomba de fluido **114** puede usarse para proporcionar un flujo de fluido desde la fuente de fluido **104**, o reservorio fuente, a través del elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir un elemento separador hidrodinámico, que devuelve un flujo principal a la fuente de fluido **104** a través de un filtro. Los sistemas industriales con fluidos líquidos pueden utilizar sistemas de filtración de bucle renal para eliminar partículas. El elemento separador de partículas **102** puede usarse entre la bomba de fluido **114** y el filtro. El elemento de separación de partículas **102** puede proporcionar un flujo de salida principal a la fuente de fluido **104** y devolver al filtro un flujo de salida secundario que contiene determinadas partículas, lo que puede concentrar las partículas y minimizar el volumen de fluido que debe filtrarse, así como reducir la velocidad de la superficie, lo que puede disminuir la caída de presión del filtro.

Uno o más de los componentes, tal como los controladores, sensores, detectores o sistemas, descritos en el presente documento puede incluir un procesador, tal como una unidad central de procesamiento (CPU), ordenador, matriz lógica, u otro dispositivo capaz de dirigir los datos que entran o salen del componente. El procesador puede incluir uno o más dispositivos informáticos que tengan memoria, hardware de procesamiento y comunicación. El procesador puede incluir circuitos utilizados para acoplar varios componentes del controlador entre sí o con otros componentes acoplados de forma operativa al controlador. Las funciones del procesador pueden realizarse por hardware y/o como instrucciones de ordenador en un medio de almacenamiento legible por ordenador no transitorio.

El procesador puede incluir cualquiera o más de un microprocesador, un microcontrolador, un procesador de señal digital (DSP), un circuito integrado específico de la aplicación (ASIC), una matriz de puertas programables en campo (FPGA) y/o circuitos lógicos discretos o integrados equivalentes. En algunos ejemplos, el procesador puede incluir múltiples componentes, tal como cualquier combinación de uno o más microprocesadores, uno o más controladores, uno o más DSP, uno o más ASIC, y/o una o más FPGA, así como otros circuitos lógicos discretos o integrados. Las funciones atribuidas al procesador en el presente documento pueden incorporarse como software, firmware, hardware o cualquier combinación de los mismos.

En una o más realizaciones, la funcionalidad del procesador puede implementarse mediante uno o más programas informáticos que utilicen un aparato informático, que puede incluir uno o más procesadores y/o memoria. El código de programa y/o la lógica descritos en el presente documento pueden aplicarse a los datos/información de entrada para realizar la funcionalidad aquí descrita y generar los datos/información de salida deseados. Los datos/información de salida pueden aplicarse como entrada a uno o más dispositivos y/o métodos como se describe en el presente documento o como se aplicaría de manera conocida. En vista de lo anterior, será evidente que la funcionalidad del controlador como se describe en este documento se puede implementar de cualquier manera conocida por un experto en la técnica.

La **Figura 2** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluidos que puede utilizarse para manipular combustible en máquina que utiliza el elemento de separación de partículas **102**. El elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir un elemento separador hidrodinámico, puede usarse en un sistema de fluidos **120**, tal como un sistema de combustible de un motor, y puede reemplazar el uso de un filtro primario a lo largo de una línea principal de combustible **122**. En el sistema de combustible de un motor, la bomba de elevación extrae fluido del depósito de combustible y lo empuja al carril común de alta presión. Parte del combustible puede ser devuelto desde el sistema de inyectores de combustible al depósito de combustible con una línea de retorno de combustible **128**.

Como se ilustra, la bomba de fluido **114**, tal como una bomba de combustible o una bomba elevadora, puede usarse para proporcionar un flujo de fluido, tal como el combustible, desde la fuente de fluido **104**, tal como un depósito de combustible, a través del elemento de separación de partículas **102** a través de la línea principal de combustible **122**. El elemento de separación de partículas **102** puede proporcionar un flujo de salida principal a lo largo de la línea

principal de combustible **122** utilizando un primer ramal de flujo **123** hacia el destino de fluido **106**, tal como un sistema inyector de combustible, que puede incluir un carril común de alta presión, y devolver un flujo de salida secundario que contiene determinadas partículas a la fuente de fluido **104** a lo largo de un segundo ramal de flujo **124**. Algunos ejemplos no limitativos de partículas incluyen la suciedad y las gotas de agua.

5 El elemento de separación de partículas **102** puede situarse aguas arriba o aguas abajo de la bomba de fluido **114**. En la realización ilustrada, el elemento de separación de partículas **102** se sitúa aguas abajo de la bomba de fluido **114**. Un filtro **126** puede estar situado aguas abajo del elemento de separación de partículas **102** a lo largo de la línea principal de combustible **122**. El filtro **126**, o filtro de combustible, puede estar configurado para filtrar partículas de gasolina o gasóleo. El sistema de fluido **120** puede incluir también una línea de retorno de combustible **128** desde el destino de fluido **106** hasta la fuente de fluido **104**. En otras realizaciones (que no se muestran), el filtro **126** puede estar colocado a lo largo se, u otro filtro **126** también puede estar colocado a lo largo se, el segundo ramal de flujo **124**, que pueden filtrar partículas con un caudal y una caída de presión menores.

15 El elemento de separación de partículas **102** puede estar configurado para eliminar partículas que excedan, o sean mayores que, un tamaño umbral particular en diámetro desde la línea principal de combustible **122** mientras que la bomba de fluido **114** proporciona combustible a un caudal particular para el funcionamiento del motor y proporciona tales partículas al segundo ramal de flujo **124**. Ejemplos no limitativos de tamaños de umbral particulares incluyen 1, 2, 5, 10, 15 o 20 micrómetros.

20 La salida del elemento de separación de partículas **102** puede describirse como que tiene dos flujos de salida: un flujo de salida "limpio" a lo largo del primer ramal de flujo **123** hacia la línea principal de combustible **122** y un flujo de salida "sucio" a lo largo del segundo ramal de flujo **124**. El flujo de salida limpio puede estar predominantemente libre de partículas por encima del tamaño umbral. El flujo de salida limpio puede enviarse al filtro **126** y, en última instancia, al destino de fluido **106**, se muestra como un carril común de alta presión de un sistema de inyectores de combustible. El flujo de salida sucio puede contener la mayoría de las partículas por encima del tamaño crítico. La corriente sucia puede enviarse de vuelta a la fuente de fluido **104**, que se muestra como un depósito de combustible. En otras realizaciones, el flujo de salida sucio puede combinarse con la línea de retorno de combustible procedente del sistema carril común de alta presión. En otras palabras, el segundo ramal de flujo **124** puede estar acoplado fluidamente a la línea de retorno de combustible **128** antes de volver a la fuente de fluido **104**. El elemento de separación de partículas **102** puede tener un mecanismo para controlar el flujo de salida sucio a lo largo del segundo ramal de flujo **124**, tal como una válvula (no mostrada), para facilitar el funcionamiento a medida que la restricción de presión del filtro aumenta con el tiempo debido a la carga del filtro **126** a lo largo del primer ramal de flujo **123**.

35 La **Figura 3** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluidos que puede utilizarse para manipular combustible a granel utilizando el elemento de separación de partículas **102**. El elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir un elemento separador hidrodinámico, puede usarse en un sistema de fluidos **140**, tal como una estación de suministro de combustible, y puede usarse para eliminar partículas antes de suministrar el combustible al destino de fluido **106**, tal como un vehículo.

40 Como se ilustra, la bomba de fluido **114** puede usarse para proporcionar un flujo de fluido, tal como el combustible, desde la fuente de fluido **104**, tal como un depósito de almacenamiento de combustible a granel, a través del elemento de separación de partículas **102** hasta una línea principal de combustible **142**. El elemento de separación de partículas **102** puede proporcionar un flujo de salida principal a lo largo de la línea principal de combustible **142** utilizando un primer ramal de flujo **143** hacia el destino de fluido **106**, tal como un vehículo, y un flujo de salida secundario que contiene ciertas partículas para retornar a la fuente de fluido **104** a lo largo de un segundo ramal de flujo **144** o para enviar al destino de fluido **108**, tal como un depósito de almacenamiento secundario. Algunos ejemplos no limitativos de partículas incluyen la suciedad y las gotas de agua.

50 El elemento de separación de partículas **102** puede situarse aguas arriba o aguas abajo de la bomba de fluido **114**. En la realización ilustrada, el elemento de separación de partículas **102** se sitúa aguas abajo de la bomba de fluido **114**. Un filtro **146** puede estar situado aguas abajo del elemento de separación de partículas **102** a lo largo de la línea principal de combustible **122**. El filtro **146**, o filtro de combustible, puede estar configurado para filtrar partículas de gasolina o gasóleo. El sistema de fluido **120** puede incluir también una línea de retorno de combustible **128** desde el destino de fluido **106** hasta la fuente de fluido **104**. En otras realizaciones (que no se muestran), el filtro **146** puede estar colocado a lo largo se, u otro filtro **146** también puede estar colocado a lo largo se, el segundo ramal de flujo **144**, que pueden filtrar partículas con un caudal y una caída de presión menores.

60 El elemento de separación de partículas **102** puede estar configurado para eliminar partículas de diámetro superior a un tamaño umbral particular de la línea principal de combustible **122** mientras la bomba de fluido **114** suministra combustible a un caudal particular apropiado para la estación de suministro de combustible y proporcionar dichas partículas al segundo ramal de flujo **144**.

65 La salida del elemento de separación de partículas **102** puede describirse como que tiene dos flujos de salida: un flujo de salida "limpio" a lo largo del primer ramal de flujo **143** hacia la línea principal de combustible **142** y un flujo de salida "sucio" a lo largo del segundo ramal de flujo **144**. El flujo de salida limpio puede estar predominantemente libre de

partículas por encima del tamaño umbral. El flujo de salida limpio puede enviarse al filtro **126** y, en última instancia, al destino de fluido **106**, se muestra como un sistema carril común de alta presión. El flujo de salida sucio puede contener la mayoría de las partículas por encima del tamaño crítico. El flujo de salida sucio puede enviarse de vuelta a la fuente de fluido **104**, mostrado como depósito de almacenamiento de combustible a granel, o puede enviarse al destino de fluido **108**, mostrado como un depósito separado para contener el combustible sucio o contaminado. El elemento de separación de partículas **102** puede tener un mecanismo para controlar el flujo de salida sucio a lo largo del segundo ramal de flujo **144**, tal como una válvula (no mostrada), para facilitar el funcionamiento a medida que la restricción de presión del filtro aumenta con el tiempo debido a la carga del filtro **146** a lo largo del primer ramal de flujo **143**.

La **Figura 4** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido que puede utilizarse para suministrar fluido hidráulico utilizando el elemento de separación de partículas **102**. El elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir elementos separadores hidrodinámicos, puede usarse en un sistema de fluidos **160**, tal como un sistema de cilindros hidráulicos, y puede usarse para eliminar partículas antes de suministrar el fluido hidráulico a los componentes hidráulicos, tal como un cilindro actuador, para proteger los componentes hidráulicos de las partículas.

Como se ilustra, la bomba de fluido **114**, tal como una bomba hidráulica, puede usarse para proporcionar un flujo de fluido desde la fuente de fluido **104**, tal como un reservorio de fluido hidráulico, a través del elemento de separación de partículas **102** hasta una línea principal de fluido **162**. La fuente de fluido **104** puede estar en comunicación fluida con una entrada de la bomba de fluido **114**. El elemento de separación de partículas **102** puede proporcionar un flujo de salida principal a lo largo de la línea principal de fluido **162** utilizando un primer ramal de flujo **163** hacia el destino de fluido **106**, tal como un componente hidráulico, que puede incluir un cilindro actuador, y un flujo de salida secundario que contiene determinadas partículas para retornar a la fuente de fluido **104** a lo largo de un segundo ramal de flujo **164**. Entre los ejemplos no limitativos de partículas se incluye la suciedad, burbujas de aire o gotas de agua. El sistema de fluido **160** puede incluir también una línea de retorno de fluido **168** desde el destino de fluido **106** hasta la fuente de fluido **104**. El segundo ramal de flujo **164** puede estar acoplado fluidamente a la línea de retorno de fluido **168** antes de volver a la fuente de fluido **104**.

El elemento de separación de partículas **102** puede situarse aguas arriba o aguas abajo de la bomba de fluido **114**. En la realización ilustrada, el elemento de separación de partículas **102** se sitúa aguas abajo de la bomba de fluido **114**. Un filtro de fluido hidráulico **166** puede estar situado aguas abajo del elemento de separación de partículas **102** a lo largo del segundo ramal de flujo **164**, la línea de retorno de fluido **168**, o ambas. Como se ilustra, el segundo ramal de flujo **164** y la línea de retorno de fluido **168** se combinan antes de llegar al filtro **166**. El filtro **166** puede estar en comunicación fluida con la fuente de fluido **104**.

La salida del elemento de separación de partículas **102** puede describirse como que tiene dos flujos de salida: un flujo de salida "limpio" a lo largo del primer ramal de flujo **163** hacia la línea principal de fluido **162** y un flujo de salida "sucio" a lo largo del segundo ramal de flujo **164**. El flujo de salida limpio puede continuar hacia el destino de fluido **106**, mostrado como componentes hidráulicos. El flujo de salida sucio puede combinarse con la línea de retorno de fluido **168**, que pasaría por el filtro **166** antes de volver a la fuente de fluido **104**, mostrada como reservorio de fluido. El elemento de separación de partículas **102** puede estar diseñado para funcionar en el intervalo de temperaturas, caudales y configuraciones del sistema (por ejemplo, la extensión de un cilindro hidráulico).

La **Figura 5** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido que puede utilizarse para desairear fluido hidráulico utilizando el elemento de separación de partículas **102**. El elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir elementos separadores hidrodinámicos, puede usarse en un sistema de fluidos **180**, tal como un sistema de cilindros hidráulicos, y puede usarse para eliminar las burbujas de aire nucleadas antes de devolver el fluido hidráulico a la fuente de fluido **104**, tal como un reservorio principal de fluido hidráulico, para proteger el destino de fluido **106**, tal como los componentes hidráulicos, de burbujas de aire.

Como se ilustra, la bomba de fluido **114**, tal como una bomba de fluido hidráulico, puede usarse para proporcionar un flujo de fluido desde la fuente de fluido **104**, tal como un reservorio principal de fluido hidráulico, a lo largo de una línea principal de fluido **182** hasta el destino de fluido **106**, tal como un componente hidráulico, que puede incluir un cilindro actuador. Puede proporcionarse un flujo de fluido de retorno del destino de fluido **106** a un filtro de nucleación **169** para nuclear burbujas de aire en el fluido a lo largo de la línea de retorno de fluido **188**. El elemento de separación de partículas **102** puede situarse a continuación del filtro de nucleación **169**. El filtro de nucleación **169** puede estar en comunicación fluida con una entrada del elemento de separación de partículas **102** y el destino fluido **106**. El elemento de separación de partículas **102** puede proporcionar un flujo de salida principal a lo largo de la línea de retorno de fluido **188** utilizando una primer ramal de flujo **183** hacia la fuente de fluido **104** y un flujo de salida secundario que contiene determinadas partículas hacia el destino de fluido **108**, tal como un reservorio de decantación o un volumen de recogida de aceite aireado, a lo largo de un segundo ramal de flujo **184**. El destino de fluido **108** puede estar en comunicación fluida con la fuente de fluido **104** con flujo restringido para permitir que el fluido hidráulico aireado se acumule y sedimente.

El fluido de un sistema de fluido hidráulico **180** es presurizado por la bomba de fluido **114**. El fluido altamente presurizado puede disolver más aire. Cuando el fluido se despresuriza en la línea de retorno de fluido **188**, el fluido

puede sobresaturarse de aire, lo que puede provocar la nucleación y formación de burbujas de aire en la corriente de fluido. Las burbujas de aire pueden eliminarse antes de que el fluido vuelva a ser recogido por la bomba de fluido **114**. Las burbujas de aire que llegan a la bomba de fluido **114** pueden provocar cavitación, lo que puede ser ruidoso y dañar la bomba de fluido. El filtro de nucleación **169** puede utilizarse para nuclear y hacer crecer burbujas de aire. El fluido cargado de burbujas de aire puede enviarse a través del elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir un separador hidrodinámico. Las burbujas de aire pueden concentrarse en un flujo de salida de "retorno de aceite aireado" a lo largo del segundo ramal de flujo **184**. El flujo de salida de retorno de aceite aireado puede devolverse al destino de fluido **108**, o reservorio de decantación, en un volumen que permita la sedimentación natural de las burbujas. El destino de fluido **108** puede ser un compartimento separado en el mismo recipiente que el destino de fluido **106**. El "retorno principal" a lo largo del flujo de salida, que no tiene burbujas de aire, se envía al destino de fluido **106** a lo largo de la línea de retorno de fluido **188** y puede estar inmediatamente disponible para que el sistema de fluido **180** lo use.

La **Figura 6** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sensor de partículas óptico o basado en la luz **200** que puede usarse en, o como, el sensor de partículas **112** (**Figura 1**). En general, puede usarse cualquier tipo adecuado de sensor de partículas, incluidos los descritos en, por ejemplo, la solicitud PCT N.º PCT/US2019/034809, presentada el 31 de mayo de 2019. Cuando el sensor de partículas **200** se utiliza para detectar gotas de fluido, el sensor de partículas **200** puede describirse como un sensor de gotas. El sensor de partículas **200** puede estar acoplado operativamente al controlador **110** y acoplado ópticamente a un canal microfluídico **201**, que puede ser parte de un separador hidrodinámico del elemento de separación de partículas **102** (**Figura 1**) o parte del elemento sensor microfluídico **116** (**Figura 1**).

Como se ilustra, el sensor de partículas **200** incluye una fuente de luz **202**, una apertura de luz **204**, y un detector de luz **206**. El controlador **110** puede estar operablemente conectado al detector de luz **206** y también puede estar operablemente conectado a la fuente de luz **202**.

El canal microfluídico **201** está configurado para recibir un flujo del fluido **208**. El canal microfluídico **201** puede tener cualquier forma de sección transversal adecuada, tal como rectangular, circular u ovalada. El sensor de partículas **200** puede estar configurado para detectar y caracterizar las partículas **210**, tal como gotas de líquido, burbujas de aire, suciedad, metal, en el flujo del fluido **208** que pueden fluir a través del canal microfluídico **201**.

Las partículas **210** pueden dispersarse en el fluido **208** del canal microfluídico **201**. Por ejemplo, las partículas **210** pueden estar suspendidas en el fluido **208** en una fase separada o estar hechas de una composición o material diferente. En otras palabras, las partículas **210**, que pueden ser líquidas, no se disuelven en el fluido **208**. En un ejemplo, las partículas **210** pueden incluir un fluido distinto del fluido **208**.

En general, el canal microfluídico **201** está dimensionado para recibir una o más de las partículas **210** a la vez. En algunas realizaciones, el canal microfluídico **201** tiene un área de sección transversal dimensionada para recibir una partícula **210** de un tamaño predeterminado a la vez. En particular, el área de la sección transversal del canal microfluídico **201** puede tener aproximadamente el mismo tamaño que un área de la sección transversal de la partícula **210**, lo que puede facilitar el recuento de una partícula **210** a la vez para facilitar el recuento y el dimensionamiento precisos de la partícula **210**.

El área de sección transversal puede definirse ortogonal a la dirección del flujo del fluido **208**. En otras palabras, el área de sección transversal puede describirse como transversal a un flujo longitudinal del fluido **208**. La sección transversal puede definirse como la altura (o profundidad) de un canal multiplicada por su anchura. Tanto la altura como la anchura del canal pueden ser ortogonales a la dirección del flujo del fluido **208**. En algunas realizaciones, la profundidad del canal es inferior que o igual a su anchura. El uso de una profundidad de canal relativamente poco profunda puede impedir que las partículas **210** se apilen entre la fuente de luz **202** y el detector de luz **206**, o que se escondan unas detrás de otras, a medida que las partículas fluyen por el canal microfluídico **201**, lo que aumenta la posibilidad de que cada partícula sea detectada.

Fuente de luz

En la realización ilustrada, la fuente de luz **202** se sitúa fuera del canal microfluídico **201**. Al menos una apertura de luz **204** está situada entre la fuente de luz **202** y el detector de luz **206**. En algunas realizaciones, la apertura de luz **204** se sitúa antes del canal microfluídico **201**, por ejemplo, entre la fuente de luz **202** y el canal microfluídico **201**. En algunas realizaciones, la apertura de luz **204** se sitúa después del canal microfluídico **201**, por ejemplo, entre el canal microfluídico **201** y el detector de luz **206**.

La fuente de luz **202** está configurada para dirigir la luz **212** a través de la apertura de luz **204** para formar el haz de luz **214**. El haz de luz **214** se dirige para que atravesase el canal microfluídico **201**. El haz de luz **214** puede ser colimado o sustancialmente colimado por la apertura de luz **204**, al menos para la longitud de trayectoria del haz de luz **214** a través del canal microfluídico **201**. El haz de luz **214** puede definir un eje del haz que se extiende a través del canal microfluídico **201**. Las paredes del canal microfluídico **201** pueden estar formadas por un material transparente a la luz, al menos a la luz **212** proporcionada por la fuente de luz **202**.

La trayectoria del haz de luz **214** que se cruza con el canal microfluídico **201** define el área de detección **216**, que también puede describirse como un volumen de detección, en el que pueden detectarse las partículas **210**. Después de que el haz de luz **214** atraviese el canal microfluídico **201**, el haz de luz **214** es recibido por el detector de luz **206**, que puede situarse fuera del canal microfluídico **201**. Cuando la partícula **210** y el fluido **208** se encuentran en el área de detección **216**, el detector de luz **206** puede usarse para determinar una absorbancia del haz de luz **214** por la partícula **210** y el fluido **208** a detectar, tamaño, o caracterizar de otro modo la partícula **210**.

Como se utiliza en el presente documento, la expresión "longitud de trayectoria" se refiere a la distancia que recorre la luz procedente de la fuente de luz **202** en el fluido a medir. En algunas realizaciones, la longitud de trayectoria puede ser aproximadamente igual a una anchura o profundidad del canal microfluídico **201**. La longitud de trayectoria puede ser pequeña para perfeccionar el perfeccionamiento de las partículas **210**. En algunas realizaciones, la longitud de trayectoria es inferior que o igual a 2000, 1000, 500, 300, 250, 200, 150 o 100 micrómetros. En una o más realizaciones, la longitud de trayectoria es inferior que o igual a 1000 micrómetros.

La fuente de luz **202** está configurada para generar luz en una banda de frecuencia seleccionada tal como para que la partícula **210** tenga una absorbancia diferente a la del fluido **208** en la banda de frecuencia seleccionada. En una o más realizaciones, la partícula **210** tiene una absorbancia mayor que el fluido **208**, por ejemplo, cuando el líquido es agua y el fluido **208** es un fluido hidrocarbonado. En aplicaciones de sistemas de combustible, por ejemplo, la fuente de luz **202** puede generar la luz **212** en al menos la banda de frecuencia del infrarrojo cercano (NIR). En algunas realizaciones, la luz NIR **212** puede incluir un pico de emisión en, o al menos incluir frecuencias en, un intervalo de 1400 a 1600 nanómetros. En particular, la luz NIR **212** puede incluir un pico de emisión centrado en o cerca de 1550 nanómetros. En algunas realizaciones, la luz NIR **212** puede incluir un pico de emisión en, o al menos incluir frecuencias en, un intervalo de al menos 900 a 1100 nanómetros. En particular, la luz NIR **212** puede incluir un pico de emisión centrado en o cerca de 1000 nanómetros.

La fuente de luz **202** puede incluir cualquier tipo adecuado de fuente de luz capaz de proporcionar la luz **212** en una banda de frecuencia seleccionada. En algunas realizaciones, la fuente de luz **202** es un diodo emisor de luz (LED). La fuente de luz LED **202** puede ser un LED de bajo consumo. En algunas realizaciones, la fuente de luz LED emite omnidireccionalmente o en todas las direcciones desde la unión de emisión de luz. En algunas realizaciones, la fuente de luz LED emite principalmente en una dirección. En algunas realizaciones, la fuente de luz **202** puede estar emparejada o incluir un cable de fibra óptica que dirige la luz al canal microfluídico **201**. La apertura de luz **204** puede usarse para permitir un haz de luz estrecho **214** a través del canal microfluídico **201**, lo que puede facilitar la eliminación de ruidos o señales falsas, por ejemplo, debido a la dispersión y la reflectancia.

La apertura de luz **204** puede ser o incluir al menos una abertura en el elemento de abertura **218**. Como se utiliza en el presente documento, "apertura" se refiere a la abertura o vacío, dentro del elemento de abertura **218**. La apertura de luz **204** puede tener una anchura que está dimensionada en relación con el canal microfluídico **201** y el detector de luz **206** para facilitar una sensibilidad óptima para detectar las partículas **210** en el fluido **208**. En algunas realizaciones, una anchura de la apertura de luz **204** es la misma o sustancialmente la misma que la anchura del canal del canal microfluídico **201**.

Adicionalmente, o como alternativa, la apertura de luz **204** puede tener un tamaño relativo a un tamaño de partícula predeterminado de interés. Por ejemplo, en algunas realizaciones, una anchura de la apertura de luz **204** puede estar diseñada para ser inferior que o igual a 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, o 10 veces el tamaño de partícula de interés. En algunas realizaciones, una anchura de apertura de luz **204** puede estar diseñada para ser superior que o igual a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, o 9 veces el tamaño de partícula de interés.

La apertura de luz **204** puede tener cualquier forma geométrica adecuada. En algunas realizaciones, la apertura de luz **204** tiene forma redonda o circular, tal como un círculo u óvalo. En algunas realizaciones, la apertura de luz **204** tiene forma poligonal, tal como un triángulo, cuadrado, trapecoide o rectángulo. La apertura de luz **204** puede tener una longitud, que puede extenderse a lo largo de la misma dirección que el flujo del fluido **208**. En una o más realizaciones, la longitud de la apertura de luz **204** puede ser la misma o sustancialmente la misma que la anchura de la apertura de luz **204**.

Detector de luz

El detector de luz **206** puede ser cualquier tipo adecuado de fotodetector sensible a la banda de frecuencia seleccionada, que puede ser una banda de frecuencia NIR. El detector de luz **206** está configurado también para proporcionar una señal que representa una cantidad de luz del haz de luz **214** restante después de pasar a través del canal microfluídico **201**. En particular, el detector de luz **206** puede estar configurado para generar una señal eléctrica, tal como una corriente, tensión o señal de potencia, en respuesta a la recepción de luz en la banda de frecuencia seleccionada. Ejemplos no limitativos de tipos de fotodetectores incluyen fotodiodos de indio-galio-arseniuro (InGaAs), de germanio (Ge) o silicio (Si). Por ejemplo, un fotodiodo de InGaAs puede ser sensible a la luz **212** en una banda de frecuencia de 1100 a 1700 nanómetros. Un fotodiodo de Ge puede tener un pico de sensibilidad a 1550 nanómetros. Se puede usar un fotodiodo de Si para la luz visible.

Controlador

5 El controlador **110** puede estar configurado para detectar, dimensionar, o caracterizar de algún otro modo a una o más partículas **210** dispersas en el flujo de fluido **208** basándose en la señal del detector de luz **206**. En algunas realizaciones, el controlador **110** puede estar configurado para detectar una partícula **210** a la vez dispersa en el flujo del fluido **208**, en particular partículas de un tamaño predeterminado.

10 En general, cuando la partícula **210** es un fluido, la partícula también puede denominarse gota. Cuando la partícula **210** es un líquido, la señal puede usarse para determinar una cantidad de líquido (por ejemplo, agua) por unidad de volumen del fluido **208** (por ejemplo, fluido de hidrocarburos) excluido el líquido disuelto en el fluido.

15 En algunas realizaciones, el controlador **110** está configurado para determinar una velocidad de partículas a través del área de detección **216**. Por ejemplo, un cambio en la absorbancia detectado a partir de la señal del detector de luz **206** puede indicar que la partícula **210** está entrando o está saliendo del área de detección **216**. Como alternativa o adicionalmente, el controlador **110** puede estar configurado para determinar un tamaño de partícula. En algunas realizaciones, el controlador **110** puede determinar una velocidad de partículas o un tamaño de partículas basándose en al menos uno de: una magnitud de un impulso contenido dentro de la señal, anchura de un impulso contenido dentro de la señal, un primer nivel umbral de señal para detectar una partícula de tamaño mínimo en el área de detección, un segundo nivel umbral de señal para detectar una partícula que llena el área de detección, y una velocidad de cruce del nivel umbral de señal. Cuando la partícula es un fluido, el controlador **110** puede determinar una cantidad de la partícula **210** en forma de gota por unidad de volumen de fluido **208**, tal como una concentración de partículas, basándose en la velocidad de partículas, tamaño de las partículas, o ambos. En algunas aplicaciones, tal como las aplicaciones no motorizadas, cuando una velocidad de partículas es regular o sustancialmente regular, la velocidad de partículas puede utilizarse para estimar o determinar un tamaño o una concentración de partículas.

20 En algunas realizaciones, el controlador **110** está configurado además para determinar una cantidad de las partículas **210** en forma de gota por unidad de volumen del fluido **208** basándose en la velocidad de goteo y el tamaño de gota. El controlador **110** también puede estar configurado para determinar un tamaño de partícula basado en la magnitud de un impulso contenido dentro de los datos de señal en respuesta a la señal que no cruza el segundo nivel umbral de señal. El controlador **110** puede estar configurado además para determinar un tamaño de partícula basado en la anchura de un impulso contenido dentro de los datos de señal en respuesta a la señal que cruza el segundo nivel umbral de señal. Además, el controlador **110** puede estar configurado para determinar un tamaño de partícula basándose en la velocidad de partícula.

Sensor basado en capacitancia

30 En otras realizaciones, puede usarse un sensor basado en capacitancia (no mostrado) como sensor de partículas **112**. Para detectar partículas individuales y evaluar la limpieza del combustible, puede fabricarse un sensor de capacitancia en el canal microfluídico **201**, por ejemplo, cerca de la salida. Los sensores de capacitancia pueden usarse para detectar partículas **210**, tales como gotas de agua u otros líquidos o partículas metálicas. El sensor de capacitancia puede incluir electrodos interdigitados para formar un condensador plano. La capacitancia de este canal puede calcularse a partir de:

45
$$C_{par} = \frac{2\epsilon_f \epsilon_0 l}{\pi} \ln \left[\left(1 + \frac{w}{a} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{w}{a} \right)^2 - 1} \right] \quad (Ec. 4)$$

donde ϵ_f es el dieléctrico del fluido en el canal microfluídico y l , w , y a son las dimensiones geométricas de los electrodos. Cuando una partícula atraviesa el canal microfluídico, el cambio en la capacitancia puede simplificarse a (aproximadamente proporcional a):

50
$$\Delta C \propto (\epsilon_p - \epsilon_f) A_p \quad (Ec. 5)$$

donde ϵ_p es el dieléctrico de la partícula y A_p es el área de la partícula.

55 Los sensores de capacitancia pueden utilizarse para detectar diversas partículas en un fluido, por ejemplo, cuando la diferencia dieléctrica entre el material particulado y el fluido es suficiente para producir una señal significativa. La tabla 1 muestra la constante dieléctrica de varias partículas y fluidos. Los materiales particulados que tienen una mayor diferencia de constante dieléctrica respecto al fluido de fondo pueden producir una mayor diferencia de señal. En general, la señal también puede estar relacionada con el tamaño de la partícula, además de con la diferencia dieléctrica entre la partícula y el fluido de fondo. En el caso de que el tamaño sea conocido (o aproximadamente conocido), que puede determinarse utilizando el elemento de separación de partículas **302** (véanse **Figuras 9-10**), la señal puede utilizarse para determinar la diferencia de constante dieléctrica, y tal vez el material contaminante.

Tabla 1

Contaminante/Fluido	Constante dieléctrica
Aceite	~3
Agua	80
Combustible	~2,1
Polietileno	2,25
Metales	Muy alta

La **Figura 7** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de una disposición **220** para usar el sensor de partículas **112** en relación con un canal microfluídico **221**. El canal microfluídico **221** puede incluir una entrada **222** y una salida **224** que tiene al menos un primer ramal de flujo **226** y un segundo ramal de flujo **228**.

El flujo de fluido **208** y las partículas **210** en el flujo del fluido pueden recibirse en la entrada **222**. Cualquier partícula **210** puede ser detectada por el sensor de partículas **112** colocado a lo largo del canal microfluídico **221** para proporcionar datos de señal que representan una señal correspondiente al fluido **208** y las partículas **210** dispersas en el fluido. El controlador **110** puede estar acoplado operativamente al sensor de partículas **112** para recibir una indicación de que se han detectado partículas **210**.

El controlador **110** puede estar acoplado operativamente a un elemento de enrutamiento de flujo **230** situado a lo largo de al menos un ramal de flujo **226**, **228** de la salida **224**. En la realización ilustrada, el elemento de enrutamiento de flujo **230** incluye una única válvula **232** situada entre el primer ramal de flujo **226** y el segundo ramal de flujo **228** para desviar selectivamente el flujo de fluido a un ramal o al otro ramal. El controlador **110** puede estar configurado para controlar el elemento de enrutamiento de flujo para dirigir el flujo de fluido al primer ramal de flujo **226**, por ejemplo, hasta que un nivel umbral de partículas **210** sea detectado por el sensor de partículas **112** en el canal microfluídico **221**. El controlador **110** puede estar configurado también para determinar si un nivel umbral de las partículas **210** está presente en el canal microfluídico **221** basándose en los datos de señal procedentes del sensor de partículas **112**. En respuesta a la determinación de que el nivel umbral de partículas **210** está presente en el canal microfluídico **221**, el controlador **110** puede controlar el elemento de enrutamiento de flujo **230** para dirigir el flujo de fluido al segundo ramal de flujo **228**.

El nivel umbral de partículas **210** puede determinarse de cualquier manera adecuada. Algunos ejemplos no limitativos incluyen la detección de uno o más partículas por encima de un tamaño umbral, detectar un número de partículas superior a un número umbral, detectar una velocidad (o frecuencia) umbral de partículas, o detectar una concentración umbral de partículas en el fluido.

El controlador **110** puede determinar también un caudal del fluido **208** en el canal microfluídico **221**. El caudal puede utilizarse para determinar un momento adecuado para controlar el elemento de encaminamiento de fluido **230** para dirigir fluido al segundo ramal de flujo **228** y una duración para controlar el elemento de encaminamiento de fluido para dirigir fluido de vuelta al primer ramal de flujo **226**.

El elemento de enrutamiento de flujo **230** puede incluir una, dos, o más válvulas **232**, solenoides, cualquier otro mecanismo adecuado para desviar el flujo del fluido **208**. En algunas realizaciones (no mostradas), el elemento de enrutamiento de flujo **230** incluye dos válvulas **232** posicionadas cada una a lo largo de uno de los ramales de flujo **226**, **228**. Las válvulas **232** pueden abrirse o cerrarse alternativamente para permitir que el fluido **208** fluya a través del primer ramal de flujo **226** o del segundo ramal de flujo **228**.

40 Eliminación de gotas de agua

En algunas realizaciones, la disposición **220** puede describirse como un sistema de eliminación de gotas de agua o un sistema microfluídico desviador de gotas de agua, que puede usarse para eliminar las gotas de agua, tal como la partícula **210**, de un fluido de hidrocarburos. El sistema desviador puede incluir un desviador de gotas microfluídico, o un elemento de enrutamiento de flujo **230**, y el sensor de partículas **112** (por ejemplo, tipos ópticos o de capacitancia) que pueden detectar gotas de agua individuales en el canal microfluídico **221**. En el caso de que el canal microfluídico **221** contenga una gota de agua, el fluido puede desviarse a una corriente residual, de tal manera que el segundo ramal de flujo **228**, mediante un conmutador de válvula u otro mecanismo, tal como la válvula **232**. El flujo de residuos puede enviarse a una área de recogida de residuos, enviado a un filtro de eliminación de agua (tal como un filtro de barrera o coalescente), o devuelto al depósito principal de combustible. El tiempo de desviación del fluido puede determinarse a partir de la geometría del canal microfluídico (tal como las dimensiones y la longitud entre el sensor y la válvula desviadora) y del caudal. Después de la gota de agua se envía a la corriente de residuos, la válvula desviadora puede conmutarse de tal manera que el fluido se envíe a la salida principal, de tal manera que el primer ramal de flujo **226**. La salida principal se considera limpia (tal como combustible sin gotas de agua) y puede enviarse a un filtro de eliminación de partículas, sistema carril común de alta presión, u otra parte del sistema de combustible.

En otra configuración, el desviador microfluídico de gotas de agua puede incluir dos válvulas. Una válvula puede estar en el canal de salida principal, tal como el primer ramal de flujo **226**, y la otra puede estar en el canal de salida de residuos, o el segundo ramal de flujo **228**. Las válvulas pueden estar cerca de la unión donde el canal de flujo de entrada, el canal de salida de residuos, y el canal de salida principal se encuentran, y así se incorporan a un dispositivo microfluídico. Como alternativa, las válvulas pueden estar alejadas de la unión y ser independientes del dispositivo microfluídico (por ejemplo, en los tubos o tuberías que salen del dispositivo). Cuando el sensor de gotas de agua detecta una gota de agua, la válvula de salida principal puede cerrarse y la válvula de salida de residuos puede abrirse.

El sistema desviador puede contener más de un canal microfluídico para aumentar el rendimiento total. Múltiples canales pueden o no compartir el mismo sensor de partículas **112**. El canal que contiene la gota de agua puede detectarse haciendo que la salida del sensor sea específica de ese canal (véase **Figuras 11A-B**).

El sistema desviador también podría usarse con un sistema de combustible con dos elementos coalescentes en paralelo. Cuando el sensor de agua situado aguas abajo de los primeros elementos coalescentes detecta agua, una o más válvulas pueden conmutar el flujo del primer elemento coalescente al segundo elemento coalescente. Esto puede permitir a los conductores cambiar de filtro en un intervalo más largo o en un momento más conveniente.

La **Figura 8** es un diagrama conceptual que muestra otro ejemplo de una disposición **240** para usar el sensor de partículas **112** en relación con un canal microfluídico **241** de un separador hidrodinámico **260**, que puede describirse como un canal de separación microfluídico. El canal microfluídico **241** puede incluir una entrada **242** y una salida **244** que tiene al menos un primer ramal de flujo **246** y un segundo ramal de flujo **248**. Como se ilustra, el canal microfluídico **241** del separador hidrodinámico **260** es curvo. La curva puede seguir una forma circular. En otras realizaciones, el canal microfluídico **241** puede ser curvo y tener forma de S múltiple. Puede usarse cualquier forma curva adecuada para proporcionar fuerzas de inercia suficientes para concentrar partículas en un intervalo de tamaño particular a un caudal particular. La entrada **242** puede estar situada en un extremo, o región extrema, y la salida **244** puede estar situada en un extremo opuesto, o región extrema.

El separador hidrodinámico **260** puede estar diseñado de tal manera que, a un caudal predeterminado de fluido **208**, el canal microfluídico **241** está configurado para dirigir cualquier partícula **210** que supere un tamaño umbral correspondiente al segundo ramal de flujo **248** y cualquier partícula restante tanto al primer ramal de flujo **246** como al segundo ramal de flujo **248** de la salida **244**.

El flujo de fluido **208** y las partículas **210** en el flujo del fluido pueden recibirse en la entrada **242**. Cualquier partícula **210** puede ser detectada por el sensor de partículas **112** colocado a lo largo del canal microfluídico **241** para proporcionar datos de señal que representan una señal correspondiente al fluido **208** y las partículas **210** dispersas en el fluido. El controlador **110** (**Figura 1**) puede estar acoplado operativamente al sensor de partículas **112** para recibir una indicación de que se han detectado partículas **210**.

El controlador **110** puede estar acoplado operativamente a la bomba de fluido **114** (**Figura 1**) en comunicación fluida con el canal microfluídico **241** del separador hidrodinámico **260**. La bomba de fluido **114** puede estar configurada para dirigir el fluido a través de los canales microfluídicos **241** de uno o más separadores hidrodinámicos **260**. El controlador **110** puede estar configurado para controlar la bomba de fluido para dirigir el fluido a través del elemento de separación hidrodinámica de la entrada **242** a la salida **244**. El controlador **110** puede estar configurado también para determinar si un nivel umbral de las partículas **210** está presente en el canal microfluídico **241** basándose en los datos de señal procedentes del sensor de partículas **112**. En respuesta a la determinación de que el nivel umbral de partículas **210** está presente en el canal microfluídico **241**, el controlador **110** puede controlar la bomba de fluido **114** para dirigir fluido al caudal predeterminado del fluido **208** a través del canal microfluídico del separador hidrodinámico **260** para centrar cualquier partícula que supere el tamaño umbral correspondiente hacia el segundo ramal de flujo **248**.

El sensor de partículas **112a, b** puede colocarse en cualquier ubicación adecuada a lo largo del canal microfluídico **241**. En algunas realizaciones, el sensor de partículas **112a, b** puede situarse entre la entrada **242** y la salida **244**. En algunas realizaciones, el sensor de partículas **112a** puede colocarse más cerca de la entrada **242**. Más cerca de la entrada **242**, las partículas **210** por encima del tamaño umbral pueden no concentrarse a lo largo de una pared interior **262** del separador hidrodinámico **260**. El sensor de partículas **112a** puede definir un área de detección (ilustrada esquemáticamente en línea continua) que cubre la mayor parte o la totalidad de la anchura del canal microfluídico **241** de la pared interior **262** a una pared exterior **264**. Más cerca de la salida **244**, las partículas **210** por encima del tamaño umbral pueden concentrarse a lo largo de la pared interior **262** del separador hidrodinámico **260**. Un sensor de partículas **112b** situado hacia la salida **244** puede definir un área de detección (ilustrada esquemáticamente en línea continua) que cubra parte o menos de la mitad de la anchura del canal microfluídico **241** de la pared interior **262** a la pared exterior **264**.

En general, cuando se detecta una gota, la disposición **240** puede cambiar el flujo de fluido para concentrar la gota en la corriente de residuos. El flujo puede calibrarse para eliminar gotas o partículas de tamaño específico basándose en la información de tamaño del sensor de partículas **112a, b**. El caudal podría modificarse con un impulso de presión, inmersión, o cambios en las vías de flujo (tal como la abertura o el cambio de posición de una o más válvulas situadas en la salida **244**).

En algunas realizaciones, la corriente de residuos, tal como el segundo ramal de flujo **248**, puede ser sólo una fracción del tamaño del flujo total. Esto puede minimizar el impacto en el flujo global al eliminar las gotas.

5 Las **Figuras 9-10** son diagramas conceptuales que muestran otra disposición **300** para usar el sensor de partículas **112** con un elemento de separación de partículas **302** y el elemento sensor microfluídico **116**. La disposición **300** puede utilizarse para clasificar las partículas **210** y calcular un número de partículas dentro de diferentes intervalos de tamaño. Aunque un elemento de separación de dos etapas **302** se muestra para separar partículas en tres rangos de tamaño, puede utilizarse cualquier número adecuado de etapas (n) para separar las partículas en diferentes intervalos de tamaño ($n+1$ intervalos de tamaño).

15 En la realización ilustrada, el elemento de separación de partículas **302** está configurado para clasificar las partículas **210** en un primer intervalo de tamaño, un segundo intervalo de tamaño, y un tercer intervalo de tamaño en un primer flujo de salida **304** (que contiene partículas en el primer intervalo de tamaño, segundo intervalo de tamaño y tercer intervalo de tamaño), un segundo flujo de salida **306** (que contiene partículas en el segundo intervalo de tamaño y en el tercer intervalo de tamaño), y un tercer flujo de salida **308** (que contiene partículas en el tercer intervalo de tamaño) para su detección por el elemento sensor microfluídico **116**. El sensor de partículas **112** puede colocarse a lo largo del elemento sensor microfluídico **116** para detectar el número de partículas en cada flujo de salida **304**, **306**, **308**. El controlador **110** (**Figura 1**) puede determinar un número de las partículas asociadas con cada intervalo de tamaño basándose en fracciones de volumen asociadas con los ramales de flujo del elemento de separación de partículas **302**.

25 Como se puede observar en la **Figura 10**, el elemento de separación de partículas **302** puede incluir al menos un primer separador hidrodinámico **320** y un segundo separador hidrodinámico **322**. Cada separador hidrodinámico **320**, **322** puede definir un canal microfluídico curvo para separar partículas de diferentes cambios de tamaño, que puede describirse como un canal de separación microfluídico. La salida del primer separador hidrodinámico **320** puede incluir una primer ramal de flujo **326** y un segundo ramal de flujo **328**. La salida del segundo separador hidrodinámico **322** puede incluir una primer ramal de flujo **330** y un segundo ramal de flujo **332**.

30 El segundo ramal de flujo **328** del primer separador hidrodinámico **320** puede estar configurado para proporcionar el primer flujo de salida **304**. El segundo ramal de flujo **332** del segundo separador hidrodinámico **322** puede estar configurado para proporcionar el segundo flujo de salida **306**. El primer ramal de flujo **330** del segundo separador hidrodinámico **322** puede estar configurado para proporcionar el tercer flujo de salida **308**. El primer ramal de flujo **326** del primer separador hidrodinámico **320** puede estar en comunicación fluida, o acoplado fluidamente a, la entrada del segundo separador hidrodinámico **322** para proporcionar un cuarto flujo de fluido **310**.

40 El primer separador hidrodinámico **320** puede estar configurado para centrar todas las partículas del primer intervalo de tamaño en el segundo ramal de flujo **328**. El primer intervalo de tamaño puede incluir cualquier partícula que supere un primer tamaño umbral. Cualquier partícula restante que no supere el primer tamaño umbral puede proporcionarse tanto al primer ramal de flujo **326** como al segundo ramal de flujo **328**. Las partículas restantes pueden considerarse uniformemente distribuidas. La proporción de partículas restantes proporcionadas a cada ramal **326**, **328** puede determinarse basándose en las fracciones de volumen asociadas a cada ramal **326**, **328**. En general, el primer ramal de flujo **326** puede recibir una primera porción, y el segundo ramal de flujo **328** puede recibir una segunda porción de cualquier partícula restante que no supere el primer tamaño umbral. Como se puede observar en la **Figura 9**, el primer flujo de salida **304** del segundo ramal **328** incluye partículas en todos los intervalos de tamaño. Ninguno de los otros flujos de salida **306**, **308** contiene partículas que superan el primer tamaño umbral.

50 El segundo separador hidrodinámico **322** puede recibir el flujo procedente del primer ramal **326** incluyendo la segunda porción de cualquier partícula restante que no supere el primer tamaño umbral. El segundo separador hidrodinámico **322** puede estar configurado para centrar todas las partículas del segundo intervalo de tamaño en el segundo ramal de flujo **332**. El segundo intervalo de tamaño puede incluir cualquier partícula que supere un segundo tamaño umbral. Cualquier partícula restante que no supere el segundo tamaño umbral puede proporcionarse tanto al primer ramal de flujo **330** como al segundo ramal de flujo **332**, que pueden ser sólo partículas en el tercer intervalo de tamaño. Puede considerarse que las partículas restantes están uniformemente distribuidas. La proporción de partículas restantes proporcionadas a cada ramal **330**, **332** puede determinarse basándose en las fracciones de volumen asociadas a cada ramal **330**, **332**. En general, el primer ramal de flujo **330** puede recibir una primera porción, y el segundo ramal de flujo **332** puede recibir una segunda porción de cualquier partícula restante que no supere el segundo tamaño umbral. Como se puede observar en la **Figura 9**, el segundo flujo de salida **306** incluye partículas de ambos intervalos de tamaño de partícula que no superan el primer tamaño umbral, y el tercer flujo de salida **308** incluye únicamente partículas que no superan el segundo tamaño umbral.

65 El elemento sensor microfluídico **116** puede estar en comunicación fluida con el elemento separador de partículas **302**. El elemento sensor microfluídico **116** puede incluir una pluralidad de canales microfluídicos **340**, que pueden describirse como canales de detección microfluídicos, cada uno en comunicación fluida con un ramal de flujo diferente del elemento de separación de partículas **302**. Los canales microfluídicos **340** pueden estar dispuestos en paralelo. En particular, cada canal microfluídico **340** recibe un flujo de salida diferente **304**, **306**, **308**. El sensor de partículas

112 puede estar colocado y configurado para detectar el número de partículas que fluyen a través de cada uno de los canales de microfluídico **340**.

El controlador **110** puede determinar el número de partículas en cada intervalo de tamaño contando el número de partículas de cualquier intervalo de tamaño en cada flujo de salida **304, 306, 308** en los canales microfluídicos **340**. Para fines ilustrativos, suponiendo que la fracción de volumen entre cada par de ramales de flujo es 1:1 y que el número de partículas restantes (el número de partículas que no superan el tamaño umbral de partículas) se divide de forma uniforme entre las dos ramales, el número de partículas en cada flujo de salida puede calcularse de la siguiente manera:

$$\begin{cases} n_1(d > d_1) = c_1 - (c_2 + c_3) \\ n_2(d_1 \geq d > d_2) = 2(c_2 - c_3) \\ n_3(d \leq d_2) = 4c_3 \end{cases} \quad (\text{Ec. 6A, 6B, 6C})$$

donde n_1 es el primer intervalo de tamaño, n_2 es el segundo intervalo de tamaño, n_3 es el tercer intervalo de tamaño, d_1 es el primer tamaño de umbral, d_2 es el segundo tamaño de umbral, c_1 es el número de partículas contadas en el primer flujo de salida **304**, c_2 es el número de partículas contadas en el segundo flujo de salida **306**, y c_3 es el número de partículas contadas en el tercer flujo de salida **308**.

En general, la entrada del elemento de separación de partículas **302** puede recibir una distribución aleatoria de las partículas **210**. El elemento de separación de partículas **302** puede clasificar las partículas **210** en diferentes flujos de salida **304, 306, 308**. Los flujos de salida **304, 306, 308** pueden ser recibidos por un elemento sensor microfluídico **116**. El sensor de partículas **112** puede contar el número de partículas en cada canal microfluídico **340** del elemento sensor microfluídico **116** y determinar el número de partículas en cada intervalo de tamaño.

En algunas realizaciones, el sensor de partículas **112** puede incluir un detector alineado a cada canal microfluídico **340** para contar el número de partículas en cada canal. En otras realizaciones, el sensor de partículas **112** puede usar un detector compartido a través de múltiples canales para contar el número de partículas en cada canal.

La disposición **300** puede describirse como un sensor microfluídico de partículas, que puede usarse para medir el nivel de limpieza de fluidos en aplicaciones con líquidos. En un ejemplo, el sensor microfluídico de partículas puede usarse en sistemas de filtración de combustible diésel para medir la limpieza del fluido. El sensor puede colocarse aguas arriba de un filtro, aguas abajo de un filtro, o como derivación de un filtro. El sensor puede incluir una etapa de segmentación, o elemento de separación de partículas **302**, que divide las partículas en líneas de corriente, por ejemplo, basándose en los códigos de limpieza de la norma ISO, que pueden incluir partículas de 4 a 6 micrómetros en una primera corriente, partículas de 6 a 14 micrómetros en una segunda corriente, y partículas mayores de 14 micrómetros en una tercera corriente. Las partículas de tamaño inferior a 4 micrómetros pueden no contarse, o puede añadirse una etapa adicional (igual a cuatro etapas) para capturar partículas de menos de 4 micrómetros, de 4 a 6 micrómetros, de 6 a 14 micrómetros, y superior a 14 micrómetros. El sensor microfluídico de partículas puede usarse también en aplicaciones hidráulicas o de lubricación.

El sensor puede describirse como teniendo dos etapas. La primera etapa puede describirse como "etapa segregadora", de tal manera que el elemento de separación de partículas **302**, que concentra las partículas en líneas de flujo específicas basándose en su tamaño. La segunda etapa puede describirse como una "etapa de detección" que incluye múltiples canales de detección, tal como elemento sensor microfluídico **116**, en el que se envían líneas de corriente con partículas específicas a distintos canales. Cada canal individual tiene un sensor de partículas o un contador de partículas. El diseño de la etapa segregadora puede dictar qué rango de tamaño de partícula va en cada canal. Mediante el recuento o la detección de partículas en un canal de detección se puede determinar la distribución del tamaño de las partículas.

Una vez que las partículas se han concentrado en líneas de flujo basándose en su tamaño, las líneas de corriente pueden enviarse a diferentes canales de detección, tales como canales microfluídicos **340**. Cada canal de detección corresponde a un intervalo de tamaño de partícula (basándose en el diseño y el rendimiento de la etapa segregadora). Cada canal de detección puede estar asociado a un sensor de partículas. El sensor de partículas puede detectar, o contar, el paso de una partícula por el canal de detección. El sensor de partículas puede ser óptico (utilizando la absorbancia de la luz, fluorescencia, dispersión u otros métodos ópticos), electrónico (mediante sensor de capacitancia o sensor de impedancia), o magnético. Los canales de detección pueden compartir un único sensor de partículas cuando la salida de señal de cada canal es única.

Un sensor microfluídico de partículas de este tipo que utilice un esquema pasivo de concentración de partículas aguas arriba de los contadores de partículas puede no requerir calibración a medida que se cuentan las partículas. Esto puede facilitar su fabricación. El sensor microfluídico de partículas también puede estar diseñado para funcionar en un intervalo de diferentes tipos de partículas que tienen diferentes propiedades, tales como propiedades electrónicas

o magnéticas. El sensor microfluídico de partículas también puede contar partículas individuales una a una, en lugar de una lectura de fluido a granel, lo que puede aumentar la sensibilidad. El uso de canales microfluídicos también puede minimizar el efecto del fluido de fondo o portador.

5 Las **Figuras 11A-B** son diagramas conceptuales que muestran un ejemplo de una técnica para contar el número de partículas en múltiples canales microfluídicos **340a, 340b, 340c** utilizando un detector de luz compartido, tal como el detector de luz **206 (Figura 6)**. Un elemento de abertura **350** puede ser similar al elemento de abertura **218 (Figura 6)** excepto en que el elemento de abertura **350** incluye una pluralidad de aberturas **204** alineadas con cada canal microfluídico **340a, 340b, 340c**. Cada conjunto de aberturas **204** puede definir un patrón de espaciado único a lo largo del canal de detección microfluídico correspondiente **340a, 340b, 340c**. Los patrones de espaciado únicos también pueden describirse como un patrón de orificio único.

15 El controlador **110** (véase **Figura 6**) puede estar configurado para determinar datos de señal basándose en la señal del detector de luz **206** y determinar si una partícula ha atravesado el área de detección **216** basándose en los datos de señal. El controlador **110** puede determinar el patrón de espaciado único asociado con la partícula pasada a través del área de detección **216** basándose en los datos de señal. En particular, una partícula que pasa a través del canal de detección microfluídico **340a** puede proporcionar unos primeros datos de señal únicos **342a**, una partícula que pasa por el canal de detección microfluídica **340b** puede proporcionar segundos datos de señal únicos **342b**, y una partícula que pasa por el canal de detección microfluídica **340c** puede proporcionar terceros datos de señal únicos **342c**. El procesamiento de señales o el procesamiento de reconocimiento de patrones por el controlador **110** puede estar configurado para distinguir estos patrones únicos para identificar el canal de detección microfluídico correspondiente **340a, 340b, 340c** y el número de partículas en el canal de detección microfluídico correspondiente.

25 En general, los patrones de espaciado únicos proporcionan diferentes perfiles temporales para una gota que se mueve a través de un canal de detección microfluídico particular **340a, 340b, 340c**. En las realizaciones ilustradas, se coloca una serie de orificios a diferentes distancias entre sí, de tal forma que una gota que se desplace por el canal dará varias caídas de señal y el patrón temporal de las caídas es específico del canal. También se puede crear una señal única con un patrón de orificio que proporcione un perfil de señal diferente (tal como orificios de forma diferente). El espaciado único y las formas únicas también pueden usarse juntos. En el caso de que haya múltiples gotas presentes en los canales, pueden utilizarse algoritmos de deconvolución de señales para distinguir canales individuales.

35 En algunas realizaciones, también puede usarse una rejilla de difracción para controlar la luz que entra en los canales. La rejilla de difracción puede estar en el canal o encerrada en él y dirigir la trayectoria óptica hacia un detector específico de un conjunto de detectores.

Aunque la presente divulgación no está tan limitada, se obtendrá una apreciación de diversos aspectos de la divulgación a través de un análisis de los ejemplos específicos y realizaciones ilustrativas proporcionadas a continuación, que proporcionan separación de partículas para complementar o sustituir a los filtros. Diversas modificaciones de los ejemplos y realizaciones ilustrativas, así como de las realizaciones adicionales de la divulgación, se pondrán de manifiesto en el presente documento.

45 La **Figura 12** es un diagrama conceptual que muestra un ejemplo de un sistema de fluido **360** que puede utilizarse para eliminar partículas usando el elemento de separación de partículas **102**. El elemento de separación de partículas **102**, que puede incluir un elemento separador hidrodinámico, puede usarse en un sistema de fluido **360** a lo largo de una línea de flujo principal **362**.

50 Como se ilustra, la bomba de fluido **114** puede usarse para proporcionar un flujo de fluido desde la fuente de fluido **104** a través del elemento de separación de partículas **102** hasta la línea de flujo principal **362**. El elemento de separación de partículas **102** puede proporcionar un flujo de salida principal utilizando el primer ramal de flujo **363** y un flujo de salida secundario utilizando el segundo ramal de flujo **364**. El primer ramal de flujo **363** y el segundo ramal de flujo **364** pueden recombinarse a lo largo de la línea de flujo principal **362** aguas arriba del destino de fluido **106**, que puede incluir el resto del sistema **360**.

55 El flujo de salida secundario puede suministrarse a un filtro **366** a lo largo del segundo ramal de flujo **364** aguas arriba de la recombinación con el flujo de salida principal. Pueden colocarse filtros opcionales **368**, por ejemplo, a lo largo del primer ramal de flujo **363** aguas arriba de la recombinación o a lo largo de la línea de flujo principal **362** aguas abajo de la recombinación.

60 El elemento de separación de partículas **102** puede situarse aguas arriba o aguas abajo de la bomba de fluido **114**. En la realización ilustrada, el elemento de separación de partículas **102** se sitúa aguas abajo de la bomba de fluido **114**.

65 El elemento de separación de partículas **102** puede estar configurado para eliminar partículas de diámetro superior a un tamaño umbral particular de la línea de flujo principal **362** mientras la bomba de fluido **114** proporciona fluido a un caudal particular.

El elemento separador **102** puede usarse para concentrar partículas por encima de un tamaño umbral particular en una porción del flujo total de fluido. El flujo de partículas concentradas puede estar concentrado o dirigido, en el flujo de salida secundario a lo largo del segundo ramal **364**, que se puede proporcionar al filtro **366**, que puede describirse como un filtro sin salida, para eliminar las partículas. Después de pasar por el filtro **366**, fluido de la corriente de partículas concentradas procedente del segundo ramal de flujo **364** puede combinarse con el resto del fluido procedente del primer ramal de flujo **363** y suministrarse al resto del sistema mostrado como destino de fluido **106**. Las partículas por encima del tamaño crítico pueden eliminarse en gran medida del fluido total suministrado al destino de fluido **106**.

En el sistema **360**, sólo una porción del flujo total de fluido se filtra a través del filtro **366**. En algunas realizaciones, la corriente de partículas concentradas proporcionada al segundo ramal de flujo **364** puede incluir menos del 50 % del volumen total de fluido, menos del 25 % del volumen total de fluido, o menos del 10 % del volumen total de fluido. El caudal a través del filtro **366** puede ser inferior, por ejemplo, en sistemas en los que no se utilice el elemento de separación de partículas **102**. El menor caudal puede dar lugar a una menor caída de presión del filtro, mayor vida útil del filtro, o ambas cosas.

Pueden usarse filtros adicionales **368** para eliminar partículas por debajo del tamaño crítico, por ejemplo, a lo largo de la línea de "corriente limpia" a lo largo del primer ramal de flujo **363**, o a lo largo de la línea de flujo principal **362**, después de que las líneas de corriente del fluido se combinen. Un objeto de medición de caudal o de presión variable, en la corriente limpia a lo largo del primer ramal de flujo **363**, puede usarse para equilibrar adecuadamente el flujo entre las dos corrientes que salen del elemento separador **102**.

La técnica de acoplar el elemento separador **102** a un filtro puede usarse en diversas aplicaciones, tal como combustible de motor, aceite de motor, hidráulica del motor e hidráulica estacionaria. Esta técnica puede ser particularmente útil en el aceite de motor, hidráulico del motor, o hidráulico estacionario, donde el fluido vuelve a circular a través del sistema de filtrado.

EJEMPLOS

30 Fabricación de dispositivos

En el Ejemplo 1, se fabricaron separadores hidrodinámicos como dispositivos microfluídicos a partir de polidimetilsiloxano (PDMS) utilizando técnicas estándar de fotolitografía blanda. En resumen, se preparó una fotomáscara con DraftSight y se imprimió a 20.000 ppp (CAD/Art Services, Inc.; Brandon, Oregón). El molde SU-8 se preparó utilizando fotorresistencia SU-8 2100 (MicroChem, Inc.; Newton, MA). Los parámetros del proceso se describen en la hoja de datos del SU-8 2100 proporcionada por MicroChem. PDMS (Sylguard 184; Dow Corning; 10:1 p/p base: agente de curado) se vertió sobre el molde, se desgasificó durante 30 minutos y se curó en un horno durante toda la noche a 85 °C. Tras retirar el PDMS de la oblea, los orificios de entrada y salida se perforaron con agujas de biopsia. Se utilizó cinta Scotch para eliminar partículas y fibras del PDMS. El dispositivo final se preparó uniéndolo por plasma al PDMS a un portaobjetos de vidrio utilizando un limpiador de plasma Harrick a 800 micrómetros (mtorr) durante 1 minuto. El dispositivo terminado se colocó en una placa caliente a aproximadamente 100 °C durante 15 minutos. Los dispositivos se diseñaron con un radio de curvatura, anchura y profundidad de canal constantes.

45 Imágenes de partículas

En el Ejemplo 2, se suspendieron partículas fluorescentes en agua desionizada para realizar las pruebas (Tabla 1). Las partículas de 2, 10 y 20 micrómetros (μm) se suministraron en una suspensión acuosa. Estas muestras se diluyeron y se analizaron directamente.

50 Las partículas de 25 μm y 30 μm se suministraron en forma de polvo. Estas muestras se añadieron con tensioactivo dodecil sulfato sódico (SDS) a agua desionizada para preparar la solución de ensayo.

Una mezcla típica contenía 50 mg de partículas, 100 mg de SDS, y 500 ml de agua desionizada. Las distribuciones del tamaño de las partículas se confirmaron con un medidor de partículas por difracción láser (Beckman-Coulter LS-320).

Las partículas se alimentaron en separadores hidrodinámicos, elaborados de acuerdo con el Ejemplo 1, usando un sistema de flujo accionado por presión (ElveFlow OB1-Mk3; Elvesys; París, Francia). El sistema contenía un caudalímetro en línea para medir el flujo en tiempo real (Elveflow FS4 (0 - 1 ml/min) o FS5 (0,2 - 5 ml/min); Elvesys; París, Francia). El flujo era controlable por presión o por caudal dentro del paquete de software ESI.

La concentración de partículas dentro de los separadores hidrodinámicos se midió ópticamente utilizando un microscopio invertido Olympus IX-73 (Olympus Life Science; Waltham, MA) acoplado a una lámpara de vapor de mercurio de arco corto (U-HGLGPS, Olympus Life Science; Waltham, MA). Se seleccionó un cubo de filtro de fluorescencia para que coincidiera con las características de absorbanza y emisión de las partículas fluorescentes. Las imágenes se tomaron con un objetivo de 10 aumentos. Las imágenes se capturaron con una cámara Prime BSI

sCMOS (Teledyne Photometrics; Toscana, AZ) utilizando MicroManager (versión 1.4; <https://micro-manager.org/wiki/Micro-Manager>).

Tabla 2: Propiedades de las partículas fluorescentes

Tamaño de partícula (µm)	Fuente	Número de parte	Propiedades ópticas de las partículas	
			λ _{ex} (nm)	λ _{em} (nm)
2	SigmaAldrich	L3030	553	635
10	Polysciences, Inc.	18140-2	441	485
20	Polysciences, Inc.	19096-2	441	485
25	Cospheric LLC	UVPMS-BR-0,995 22-27 µm	300-550	605
30	Cospheric LLC	UVPMS-BR-1,090 27-32 µm	300-550	605

5 Antes de inyectar las partículas, se determinó una calibración presión-flujo para cada separador hidrodinámico utilizando agua desionizada (DI), para calibrar las lecturas poco fiables del caudalímetro para soluciones que contienen partículas. Los datos se ajustaron a un polinomio de segundo orden y se utilizaron para determinar las presiones de funcionamiento para los caudales experimentales deseados.

10 Durante los experimentos con partículas se controló la presión del sistema y se registraron los datos de presión-flujo. Si los datos de presión-flujo mostraron decaimiento a lo largo del marco de tiempo experimental, se supuso que las partículas se acumulaban en algún lugar del dispositivo y los datos no se registraban.

15 Después del experimento, el dispositivo se cortó a la mitad y la profundidad del canal se midió ópticamente en el microscopio digital Keyence VHX (Keyence; Itasca, IL).

20 Una vez calibrada la relación presión-flujo de un dispositivo, se realizó un experimento con un número de Dean o caudal constantes, con una única solución de partículas fluorescentes. Se tomaron imágenes de fluorescencia en varios ángulos a través del dispositivo para medir la concentración de partículas basándose en la longitud ($L = \alpha R_c$, donde α es el ángulo a través del dispositivo en radianes y R es el radio de curvatura medido en la pared interior). Los ángulos se definieron en torno a la forma circular de cada separador hidrodinámico, por ejemplo, como se muestra en la **Figura 14**. La **Figura 14** es un diagrama conceptual que muestra posiciones relativas de ángulos alrededor de un separador hidrodinámico **400** en la entrada 10° (A), 180° (B), 270° (C), y salida 350° (D). El tiempo de integración de la cámara CMOS se ajustó para maximizar las diferencias de señal sin saturar ningún píxel.

30 El grado de concentración de partículas se determinó mediante el análisis de imágenes en el software de fuente abierta ImageJ. La intensidad de los píxeles se midió a través del canal en cada punto del dispositivo en el que se tomaron imágenes. Se supone que la intensidad de los píxeles es proporcional a la concentración media de partículas. La ubicación de la concentración de partículas se determinó a partir de la imagen de salida (340° o 350°). Para cada imagen, el porcentaje de concentración se determinó como la relación entre la intensidad integrada de píxeles en la región concentrada y la intensidad integrada de píxeles de todo el canal, de la siguiente manera:

$$F\% = \frac{\int_{Concentrado} I(x)}{\int_{Canal} I(x)} \quad (Ec. 7)$$

35 La **Figura 13A** muestra una imagen representativa de la entrada del dispositivo **380** a 10 grados. La **Figura 13B** muestra una imagen representativa de la salida del dispositivo **382** a 350 grados. La **Figura 13C** es un gráfico **390** de la intensidad del píxel frente a la posición de canal (en píxeles) a través del canal señalado por la línea **384** en la **Figura 13A**. La **Figura 13D** es un gráfico **392** de la intensidad del píxel frente a la posición de canal (en píxeles) a través del canal señalado por la línea **386** en la **Figura 13A**. Las casillas **394**, **396** se consideraron las regiones concentradas.

Estudios de concentración: Mismo dispositivo, Número de Dean diferente (140 µm de profundidad: Partículas de 25 µm

45 En el Ejemplo 3, se concentraron partículas de 25 µm en un separador hidrodinámico (anchura de canal: 500 µm, profundidad de canal: 140 µm, radio de curvatura: 20 mm) en dos números de Dean. En la **Figura 15** se muestra un gráfico **410** que muestra los datos del porcentaje concentración frente a la longitud de canal para el Número de Dean de 15 a 1010 mbar de presión (3,97 ml/min). El gráfico **410** muestra tres regiones distintas: una región inicial **412** donde las partículas no están concentradas, una región **414** en la que las partículas están concentradas, y una región **416** donde las partículas se han concentrado totalmente.

50 En la entrada del dispositivo, se concentra aproximadamente un 35 % de las partículas. La cantidad de concentración no aumenta durante los primeros 14 mm de longitud de canal, lo que puede deberse a la migración de partículas desde el centro del canal hacia los bordes del mismo debido a las fuerzas de elevación por cizallamiento. Esta región **412**

del dispositivo puede describirse como la región de migración de partículas y tiene una longitud L_0 . Esta longitud puede depender del tamaño de las partículas, propiedades del fluido y caudal.

5 Después de la región de migración de partículas, el porcentaje de partículas que se concentran puede aumentar linealmente con respecto a la longitud de canal. Esta región **414** del dispositivo puede describirse como la región de concentración lineal. La pendiente del ajuste lineal puede describirse como la velocidad de concentración lineal (r_f). El porcentaje de partículas concentradas suele aumentar linealmente hasta alcanzar un valor máximo.

10 Una vez alcanzado el valor máximo de concentración de partículas, la concentración de las partículas puede permanecer aproximadamente constante. Esta región **416** del dispositivo puede describirse como la región totalmente concentrada. En este ejemplo, el porcentaje máximo de concentración (f_m) en la región totalmente concentrada muestra que es de aproximadamente el 90 % (es decir, 90 % de las partículas se concentran).

15 La longitud del separador hidrodinámico que puede usarse para alcanzar un porcentaje de concentración objetivo puede describirse como:

$$L_D = L_0 + \frac{f_t - f_0}{r_f} \quad (\text{Ec. 8})$$

20 donde L_D es la longitud de canal separador hidrodinámico necesaria para alcanzar el porcentaje de concentración objetivo, L_0 es la longitud de la región de migración de partículas, r_f es la velocidad de concentración lineal, f_0 es el porcentaje de concentración de partículas en la entrada (y durante la región de migración de partículas **414**), y f_t es el porcentaje de concentración objetivo. Esta ecuación puede usarse en particular cuando $f_0 < f_t < f_m$.

25 La tabla 3 muestra los datos de los experimentos de concentración con el mismo dispositivo realizados con diferentes números de Dean. La longitud de la región de migración de partículas y la longitud necesaria para alcanzar el 90 % de concentración son similares y casi idénticas.

Tabla 3: Datos de concentración para experimentos con el mismo dispositivo, Número de Dean diferente

Número de Dean	Longitud de la región de migración de partículas - L_0 (mm)	Velocidad de concentración lineal - r_f (%concentrado/mm)	Longitud necesaria para alcanzar el 90 % de concentración - L_D (mm)
10	14	0,57 %	110
15	14	0,58 %	108

30 Experimentos con el mismo número de Dean, Dispositivo diferente (104 μm de profundidad): Partículas de 30 μm

35 En el Ejemplo 4, se realizó un experimento similar al del Ejemplo 3 con aproximadamente los mismos números de Dean, pero en dispositivos con dos radios de curvatura diferentes. Se usaron partículas de 30 μm . Los resultados del experimento se muestran en la Tabla 4. La longitud de la región de migración de partículas fue menor en el caso del dispositivo con menor radio de curvatura. De forma adicional, el índice de concentración lineal fue mayor en el dispositivo con menor radio de curvatura. Basándose en estos resultados, la longitud necesaria para concentrar las partículas al 50 %, por ejemplo, fue menor en el caso del dispositivo con menor radio de curvatura.

Tabla 4: Datos de concentración para experimentos con el mismo número de Dean, Dispositivo diferente

Radio de curvatura - R_c (mm)	Número de Dean	Longitud de la región de migración de partículas - L_0 (mm)	Velocidad de concentración lineal - r_f (%concentrado/mm)	Longitud necesaria para alcanzar el 50 % de concentración - L_D (mm)	Caída de presión aproximada necesaria para alcanzar el 50 % de concentración - P_D (mbar)
10	21	5	0,91 %	35	600
20	23	10	0,58 %	75	1500

40 En general, el dispositivo con el radio de curvatura más pequeño puede alcanzar un número de Dean objetivo con un caudal más bajo que un dispositivo con un radio de curvatura más grande. Al comparar la caída de presión necesaria para concentrar las partículas, un radio de curvatura menor puede dar lugar a un canal más corto y a un caudal menor, lo que puede tener un gran impacto en la caída de presión.

45 Como un ejemplo, a partir de los datos de la Tabla 4 y las presiones experimentales aplicadas, la caída de presión asociada a un separador hidrodinámico diseñado para concentrar el 50 % de las partículas se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$P_D = P_{app} \frac{L_D - 360^\circ}{R_c 350^\circ + 2\pi} \quad (\text{Ec. 9})$$

donde P_{app} es la presión aplicada experimentalmente, L_D es la longitud necesaria para alcanzar el 50 % de concentración (Tabla 4), R_c es el radio de curvatura del dispositivo (Tabla 4), y el término $\frac{360^\circ}{350^\circ + 2\pi}$ da cuenta del diseño experimental del dispositivo en el que éste sólo cubría 350° de la longitud del arco del círculo para permitir los puertos de entrada y salida. Las caídas de presión calculadas se muestran en la Tabla 4. El dispositivo con un radio de curvatura más pequeño se utilizó para centrar las partículas con una caída de presión mucho menor.

Longitud de la región de concentración lineal

Recientemente se ha descubierto que la longitud de la región de concentración lineal necesaria para lograr el máximo concentración de partículas (85 %-95 % de concentración de partículas) puede describirse mediante la siguiente relación:

$$L_f \propto \frac{Re}{De^2} \frac{w^2}{D_H} = \frac{2R_c}{Re} \left(\frac{w}{D_H}\right)^2 \quad (\text{Ec. 10})$$

donde Re es el número de Reynolds, De es el número de Dean, y D_H es el diámetro hidráulico del separador hidrodinámico, w es la anchura del canal, y R_c es el radio de curvatura del separador hidrodinámico. Más específicamente, la relación es la siguiente:

$$L_f = 156,2 \frac{R_c}{Re} \left(\frac{w}{D_H}\right)^2 + 24,3 \quad (\text{Ec. 11})$$

Además, la longitud de la región de concentración lineal necesaria para lograr el máximo concentración de partículas para un tamaño de partícula específico puede describirse mediante la siguiente relación:

$$L_f = 1598,8 \frac{R_c a w^2}{Re D_H^3} + 6,4 \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde a es el diámetro de la partícula. El diámetro de las partículas puede ser el diámetro esférico equivalente para las partículas que tienen una esfericidad superior a 0,5. Esta ecuación puede ser un predictor de la longitud de la región de concentración lineal para partículas que tienen un diámetro superior al 8 % del diámetro hidráulico del canal e inferior que o igual al 50 % de la altura del canal.

La longitud total de un separador hidrodinámico puede determinarse o calcularse en:

$$L_D = L_0 + L_f \quad (\text{Ec. 13})$$

Esta ecuación puede utilizarse para calcular las longitudes mínimas de los canales del separador hidrodinámico necesarias para lograr la máxima concentración de partículas en diversas aplicaciones. Los resultados experimentales demuestran que la longitud de la región de migración de partículas L_0 está comprendida entre el 0 % y el 29 % de la longitud total del separador hidrodinámico L_D necesaria para lograr la máxima concentración de partículas. Además, los datos muestran que la longitud de la región de migración de partículas L_0 está en un intervalo del 0 % al 40 % de la longitud de la región de concentración lineal L_f . Como tal, la longitud del canal separador hidrodinámico L_D puede ser mayor o igual que la longitud de la región de concentración lineal L_f para conseguir la concentración máxima de partículas. La longitud del canal separador hidrodinámico L_D puede ser no mayor del 40 % más que la longitud de la región de concentración lineal L_f para lograr un concentración de partículas que esté en equilibrio con la minimización de la caída de presión a través del canal.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema que comprende:

5 un elemento de separación hidrodinámico que comprende uno o más separadores hidrodinámicos (260), cada uno de los cuales define un canal microfluídico curvo (241) en comunicación fluida, definiendo cada canal microfluídico (241):

10 una entrada (242) configurada para recibir un primer fluido (208) y partículas (210) dispersas en el primer fluido (208), en donde las partículas (210) tienen una composición diferente a la del primer fluido (208), y una salida (244) que comprende un primer ramal de flujo (246) y un segundo ramal de flujo (248), en donde a un caudal predeterminado, cada canal microfluídico (241) está configurado para dirigir cualquier partícula que supere un tamaño umbral correspondiente al segundo ramal de flujo y cualquier partícula restante tanto al primer ramal de flujo (246) como al segundo ramal de flujo (248);

15 un sensor de partículas (112) situado a lo largo de uno o más separadores hidrodinámicos (260) configurado para proporcionar datos de señal que representen una señal correspondiente al primer fluido (208) y a las partículas (210) en el primer fluido (208); y

20 **caracterizado por que** el sistema incluye un controlador (110) acoplado operativamente al sensor de partículas (112) para recibir los datos de señal y que puede acoplarse operativamente a una bomba de fluido (114) en comunicación fluida con el elemento de separación hidrodinámica, estando el controlador (110) configurado para:

25 controlar la bomba de fluido (114) para dirigir el primer fluido (208) a través del elemento de separación hidrodinámica,

determinar si un nivel umbral de partículas (210) está presente en al menos un canal microfluídico (241) basándose en los datos de señal del sensor de partículas (112), y

30 controlar un caudal a través del elemento de separación hidrodinámica, en respuesta a la determinación de que el nivel umbral de partículas (210) está presente en el al menos un canal microfluídico (241), dirigir el primer fluido (208) al caudal predeterminado a través del elemento de separación hidrodinámica para concentrar cualquiera de las partículas (210) que excedan el tamaño umbral correspondiente hacia el segundo ramal de flujo (248) del al menos un canal microfluídico (241),

35 en donde el sistema comprende además un reservorio fuente (104) en comunicación fluida con la entrada (242) y el segundo ramal de flujo (248), en donde el primer fluido (208) y las partículas pueden bombearse del reservorio fuente al elemento de separación hidrodinámica y selectivamente de vuelta al reservorio fuente a través del segundo ramal de flujo (248).

2. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el sensor de partículas (112) comprende:

40 una fuente de luz (202) configurada para dirigir un haz de luz (214) en una banda de frecuencias a lo largo de una trayectoria a través de al menos un separador hidrodinámico (260), en donde la banda de frecuencia es seleccionada para tener una absorbancia diferente por las partículas (210) que por el primer fluido (208); un elemento de apertura (218) que define una apertura de luz (204) situada en la trayectoria del haz de luz (214) procedente de la fuente de luz (202); y

45 un detector de luz (206) colocado para recibir el haz de luz (214) en un área de detección (216) tras atravesar el al menos un separador hidrodinámico (260) y la apertura de luz (204), el detector de luz (206) configurado para proporcionar los datos de señal que representan una cantidad de luz en la banda de frecuencia que permanece después de atravesar el al menos un separador hidrodinámico (260).

50 3. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el sensor de partículas (112) comprende un sensor de capacitancia.

4. El sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el controlador (110) está además configurado para determinar una cantidad de un segundo fluido en forma de gotas por unidad de volumen del primer fluido (208) basándose en los datos de señal.

55 5. El sistema de acuerdo con la reivindicación 4, en donde el controlador (110) está configurado para determinar una velocidad de goteo o un tamaño de goteo de una o más gotas del segundo fluido dispersas en el flujo del primer fluido (208) basándose en los datos de señal.

60 6. El sistema de acuerdo con la reivindicación 5, en donde el controlador (110) está configurado para determinar la velocidad de goteo o el tamaño de gota basándose en al menos uno de:

65 una magnitud de un impulso contenido dentro de los datos de señal,
anchura de un impulso contenido dentro de los datos de señal,
un primer nivel umbral de señal para detectar una gota de tamaño mínimo en una área de detección (216),

un segundo nivel umbral de señal para detectar una gota que llena el área de detección (216), y una velocidad de cruce del nivel umbral de señal.

5 7. El sistema de acuerdo con la reivindicación 6, en donde el controlador (110) está además configurado para determinar al menos uno de:

una cantidad del segundo fluido en forma de gota por unidad de volumen del primer fluido (208) basándose en la velocidad de goteo y el tamaño de gota;

10 basándose el tamaño de gota en la magnitud de un impulso contenido dentro de los datos de señal en respuesta a la señal que no cruza el segundo nivel umbral de señal;

basándose el tamaño de gota en la anchura de un impulso contenido dentro de los datos de señal en respuesta a la señal que cruza el segundo nivel umbral de señal; y

basándose el tamaño de gota en la velocidad de goteo.

15 8. Sistema de combustible que comprende:

una fuente de fluido (104),

un destino fluido (106, 108),

20 un sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores acoplado fluidamente entre la fuente de fluido (104) y el destino de fluido (106, 108), en donde el sistema está configurado para eliminar partículas en el combustible recibido de la fuente de fluido (104) antes de suministrar el combustible al destino de fluido (106, 108).

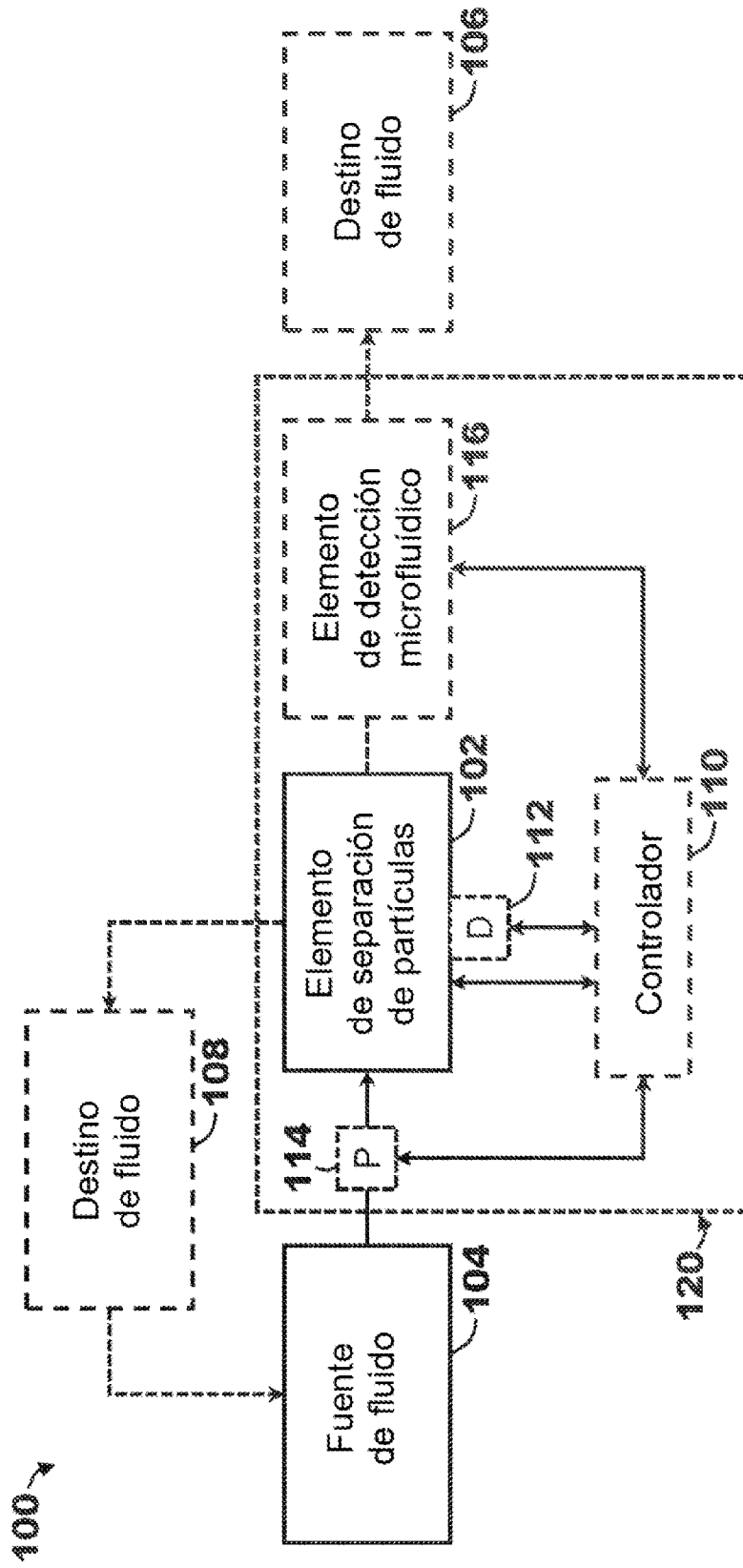


FIG. 1

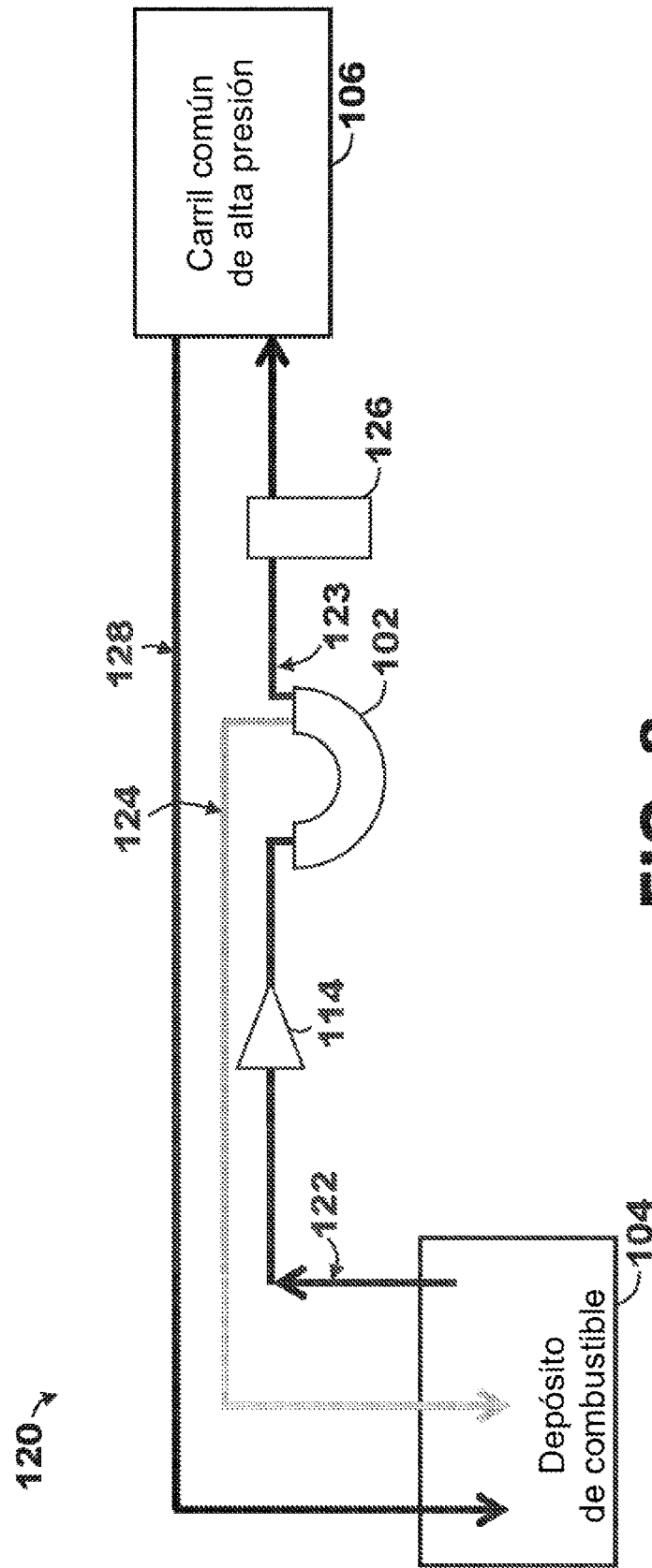


FIG. 2

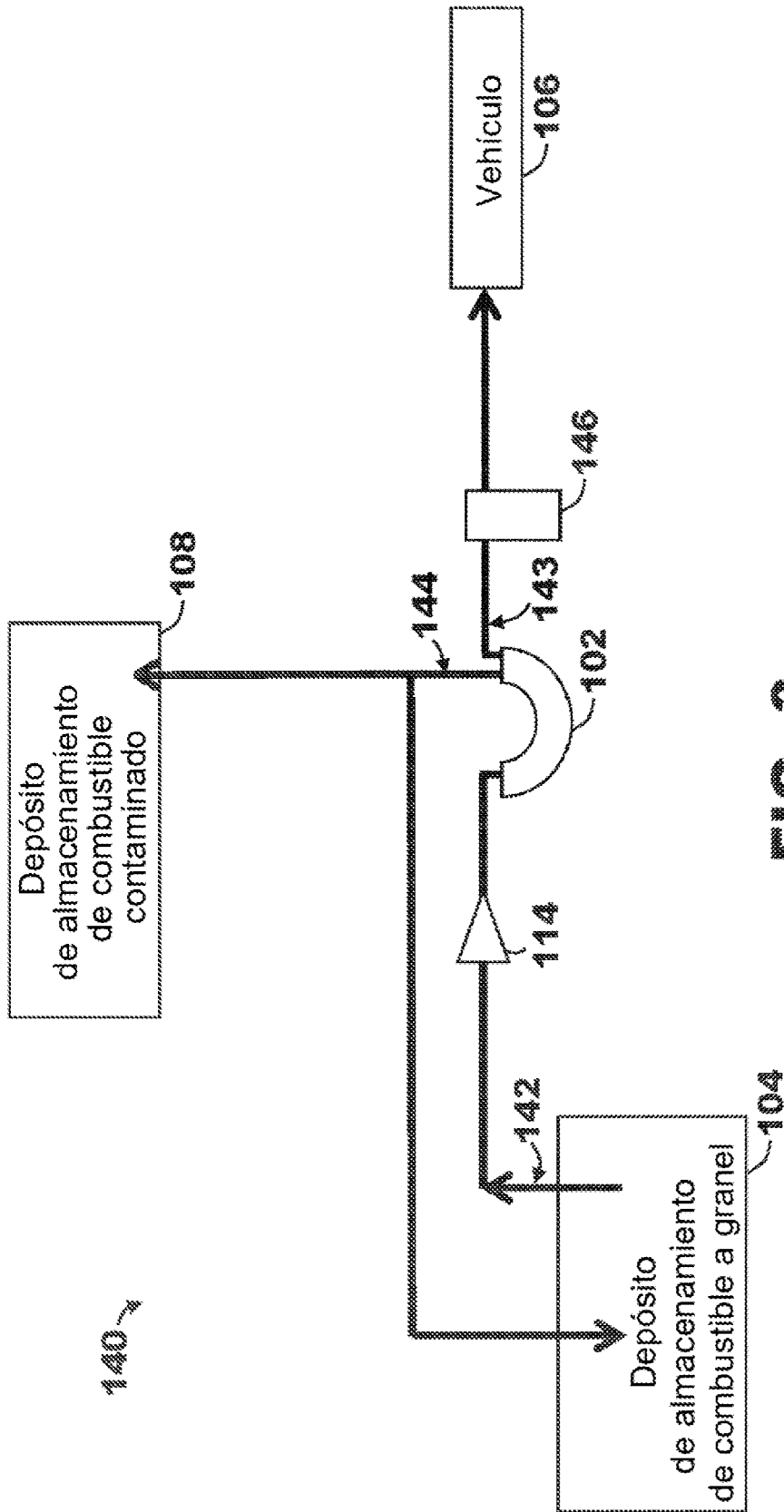


FIG. 3

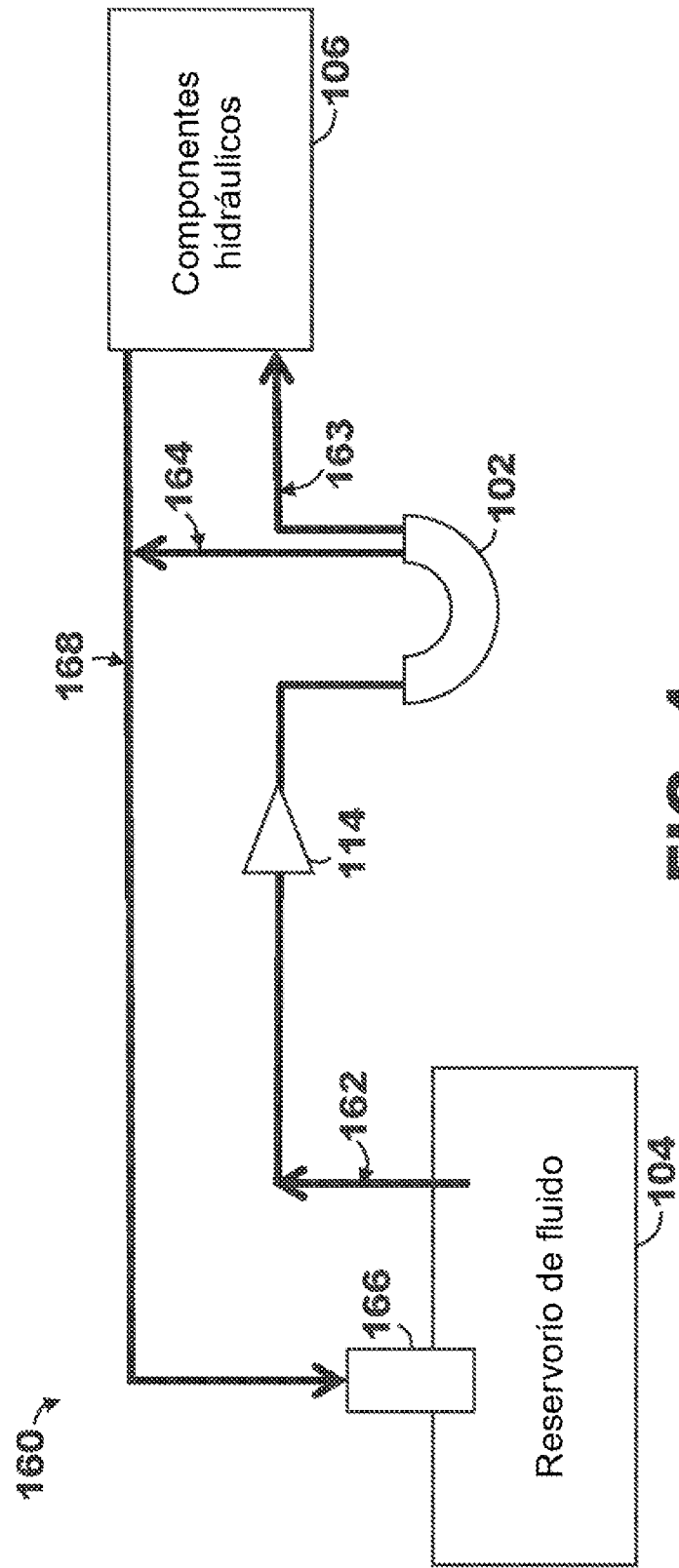


FIG. 4

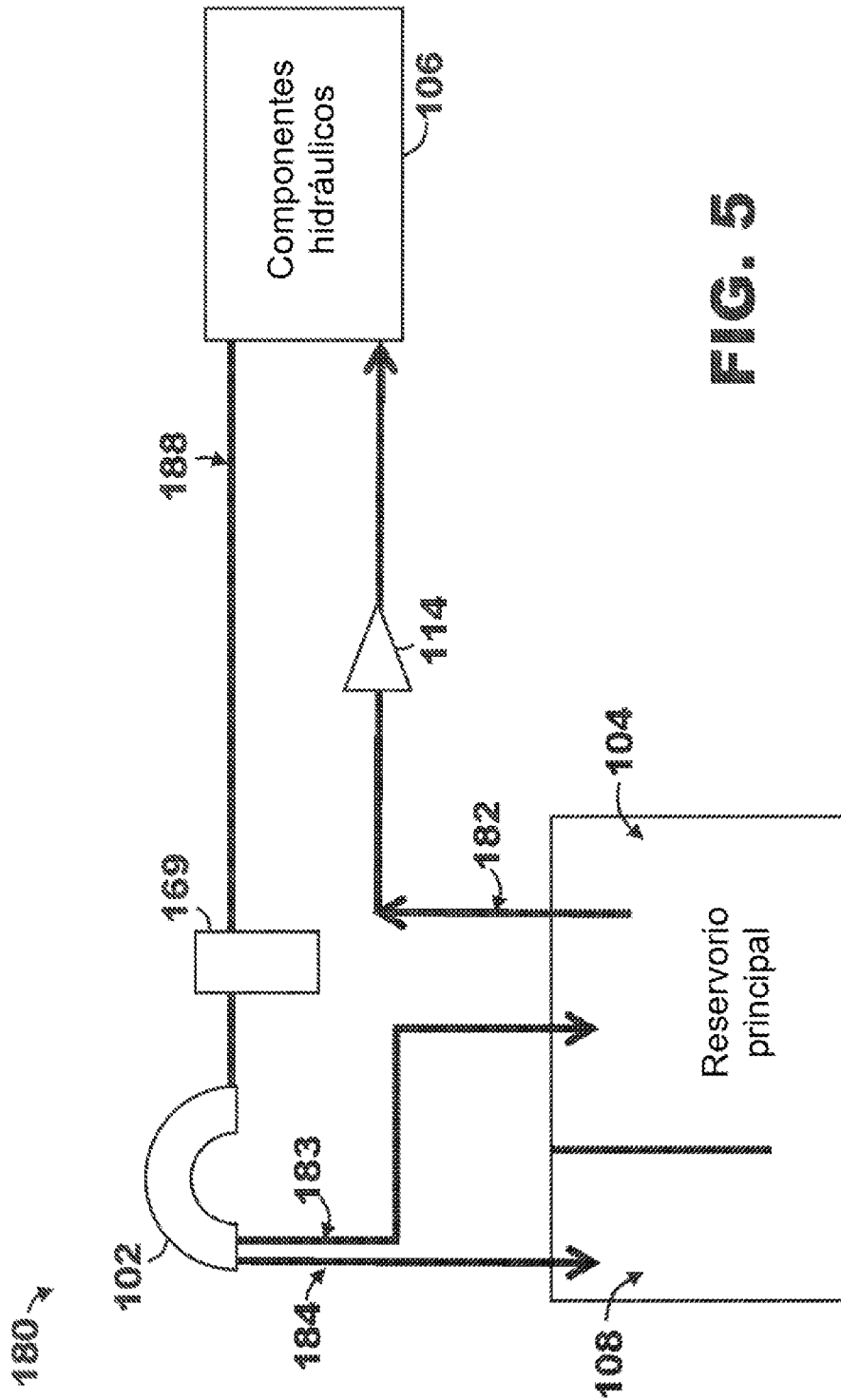


FIG. 5

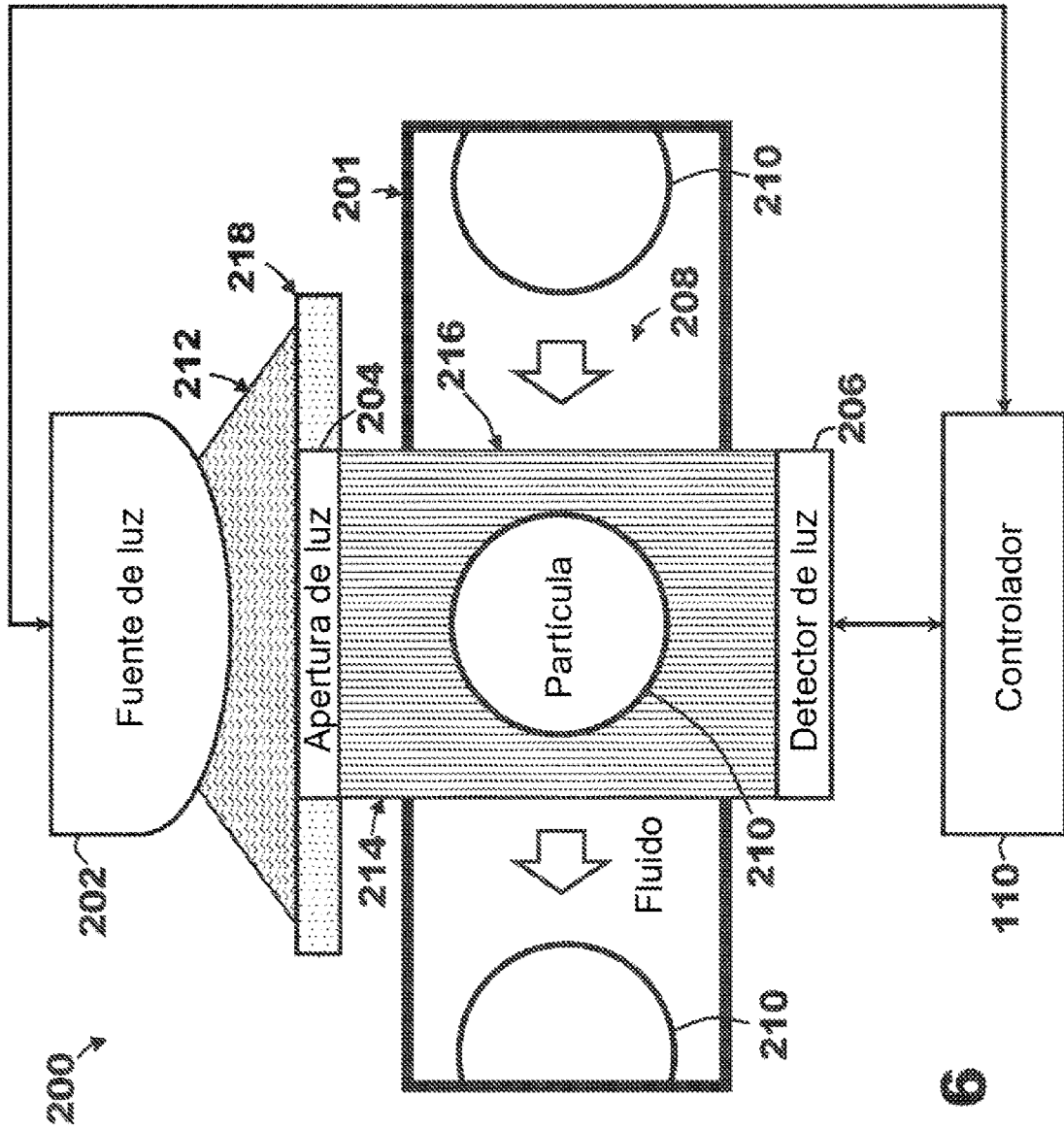


FIG. 6

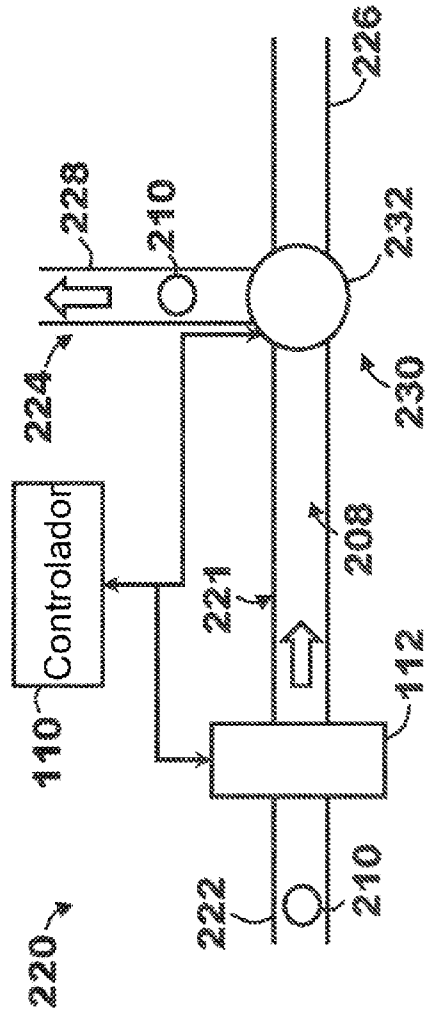


FIG. 7

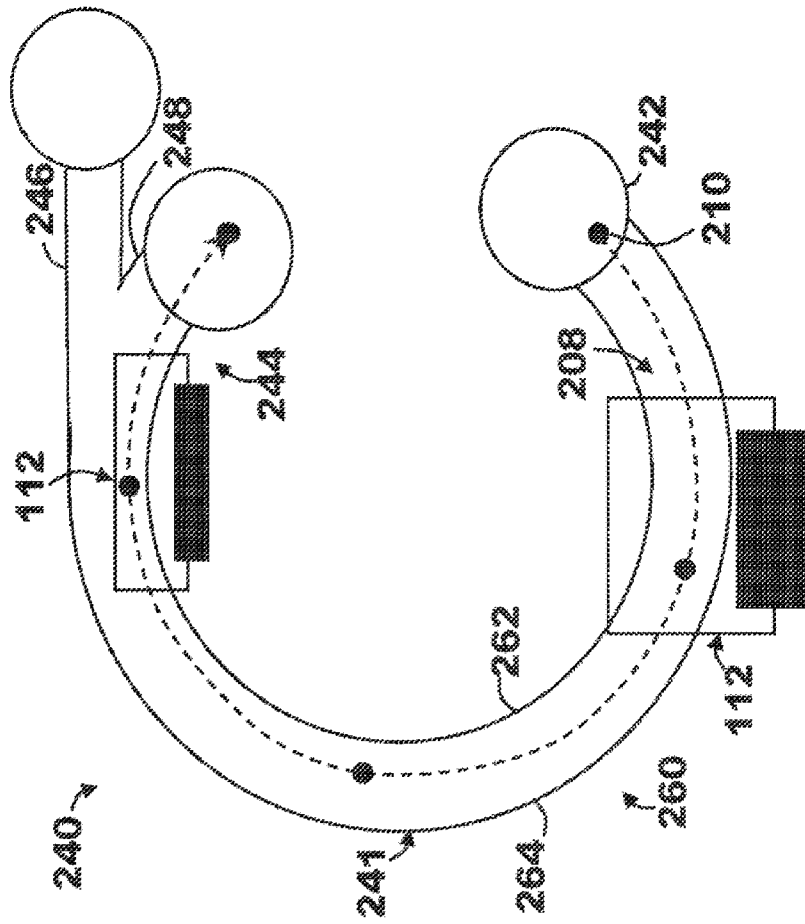


FIG. 8

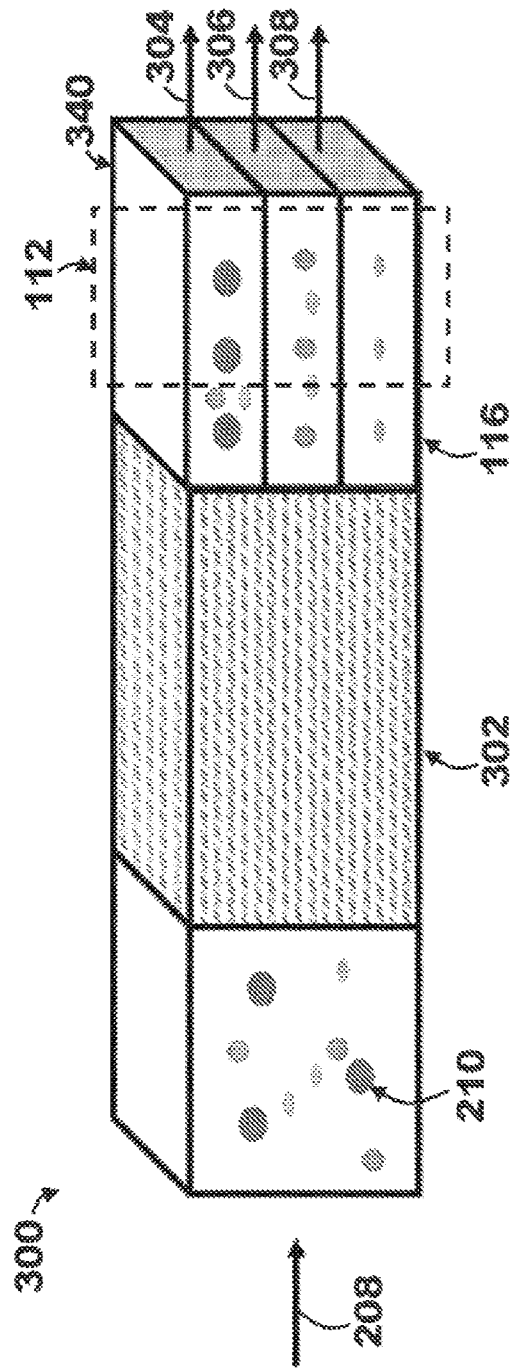


FIG. 9

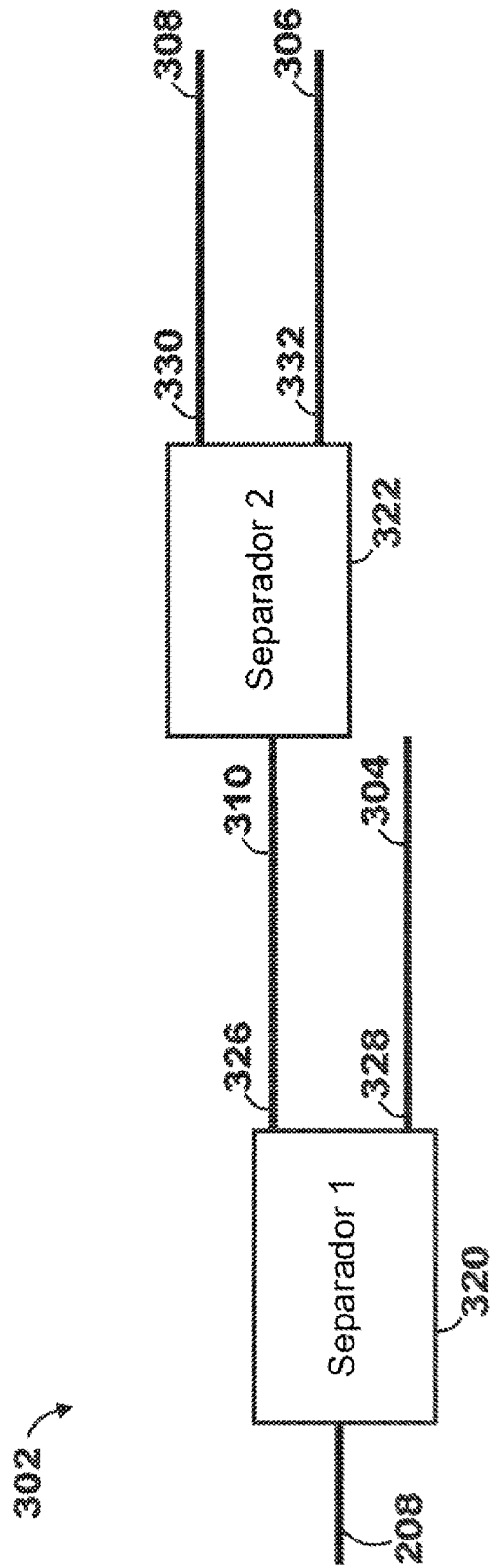


FIG. 10

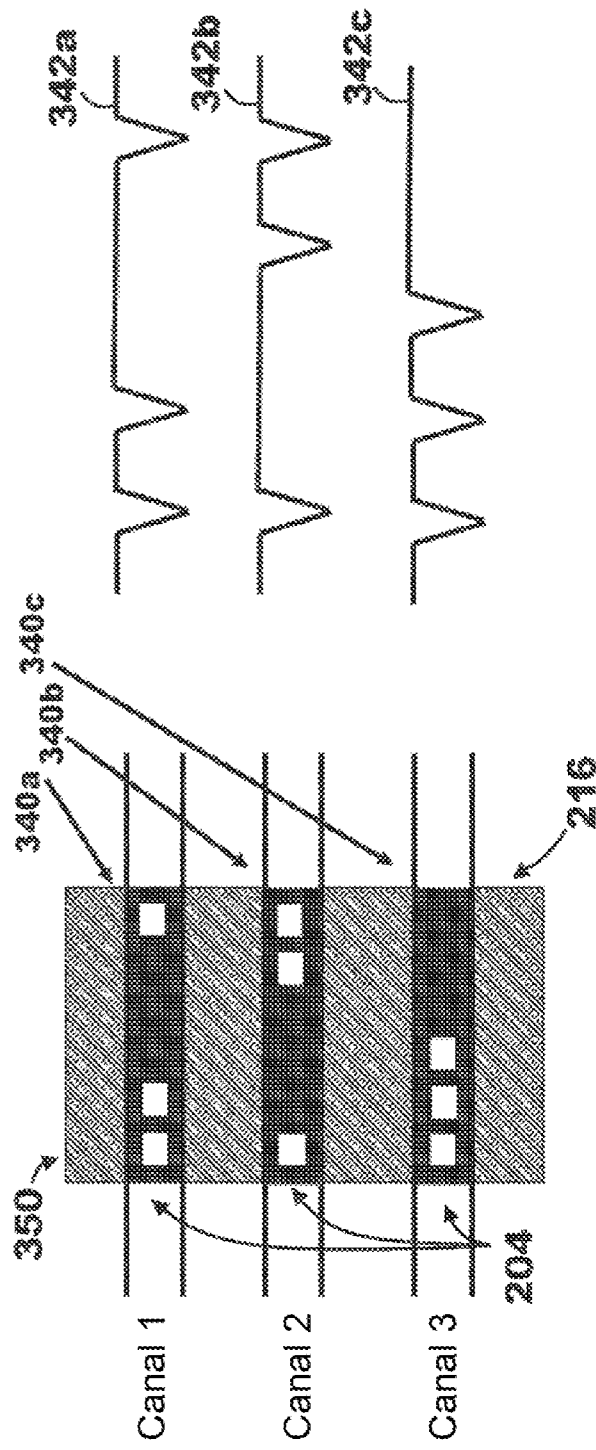
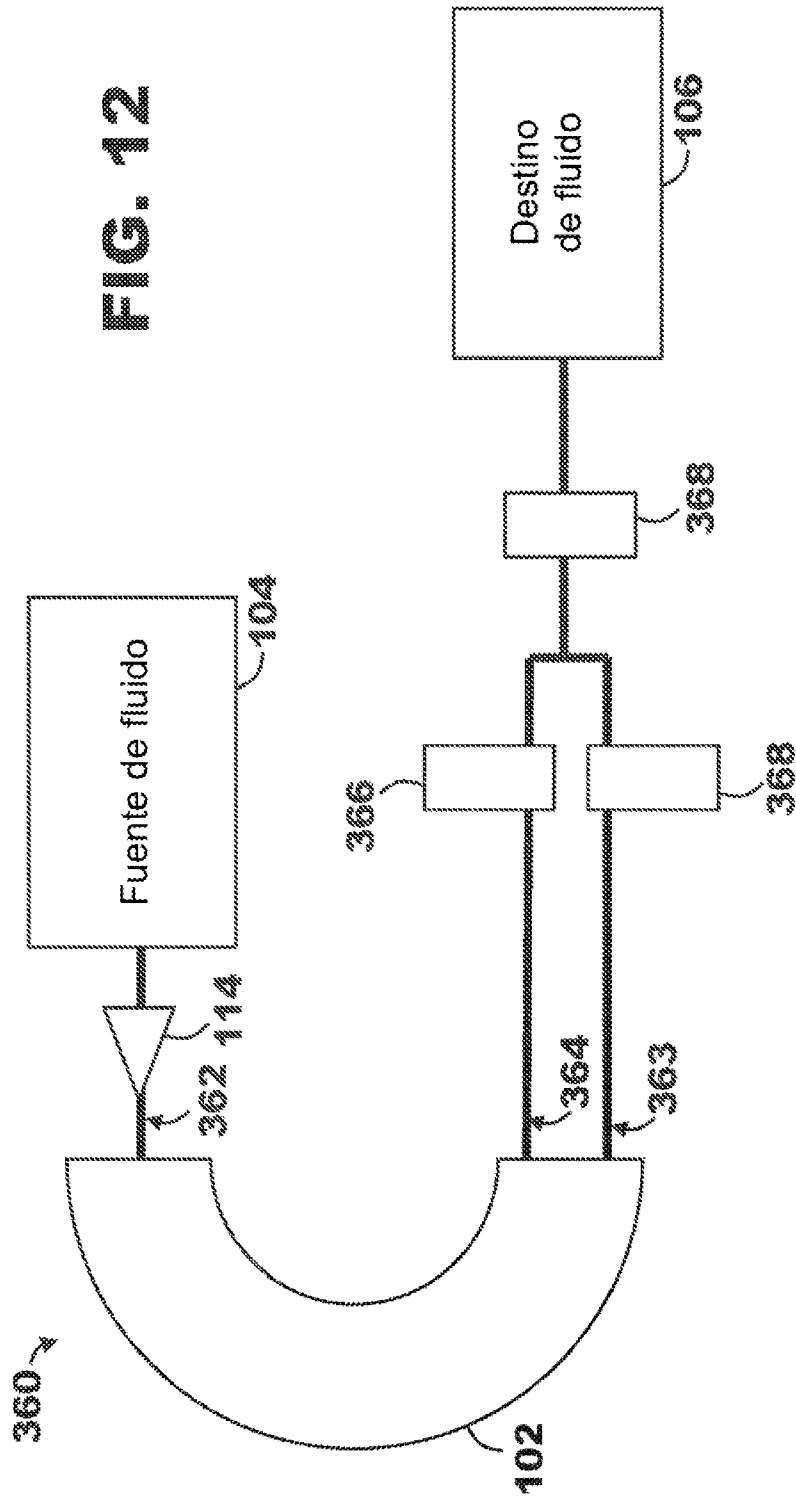


FIG. 11A

FIG. 11B

FIG. 12



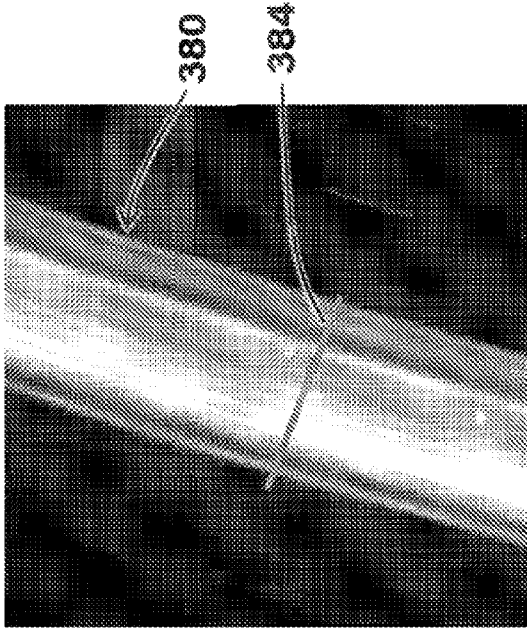


FIG. 13A

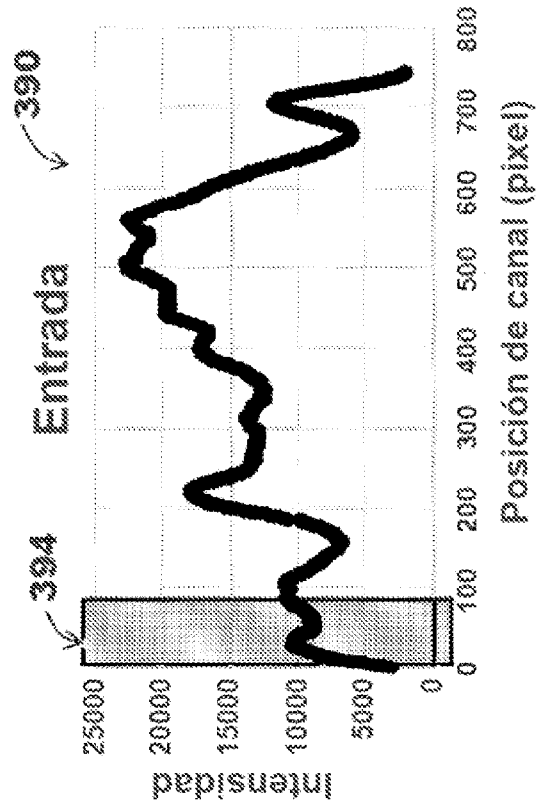


FIG. 13C

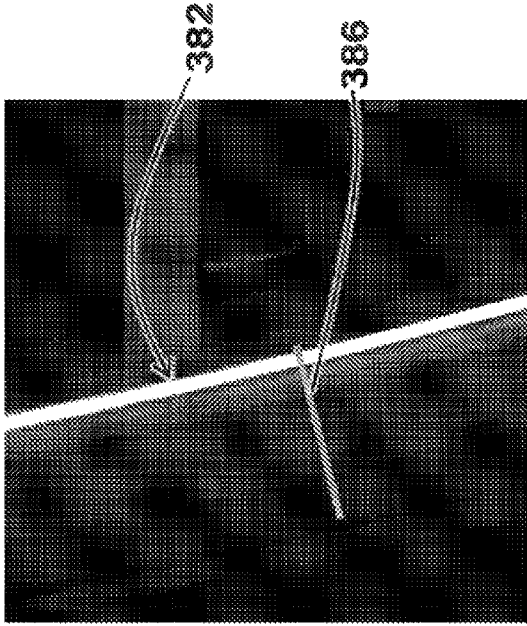


FIG. 13B

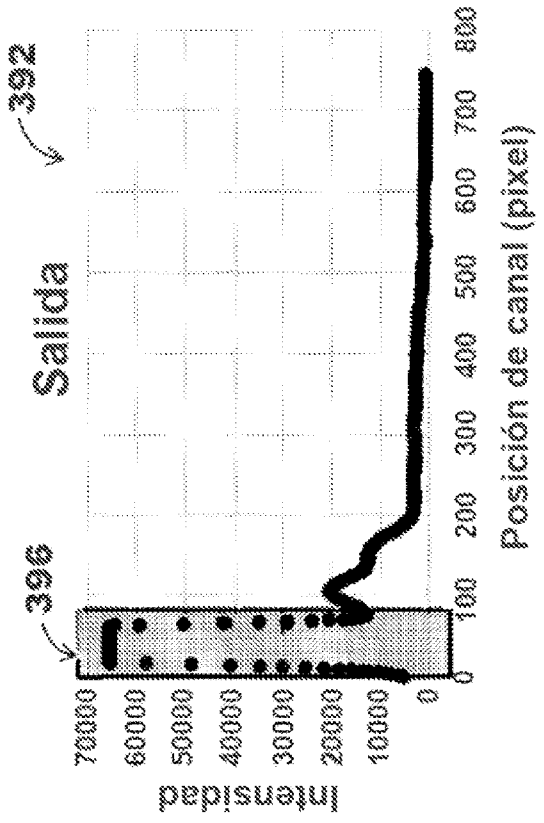


FIG. 13D

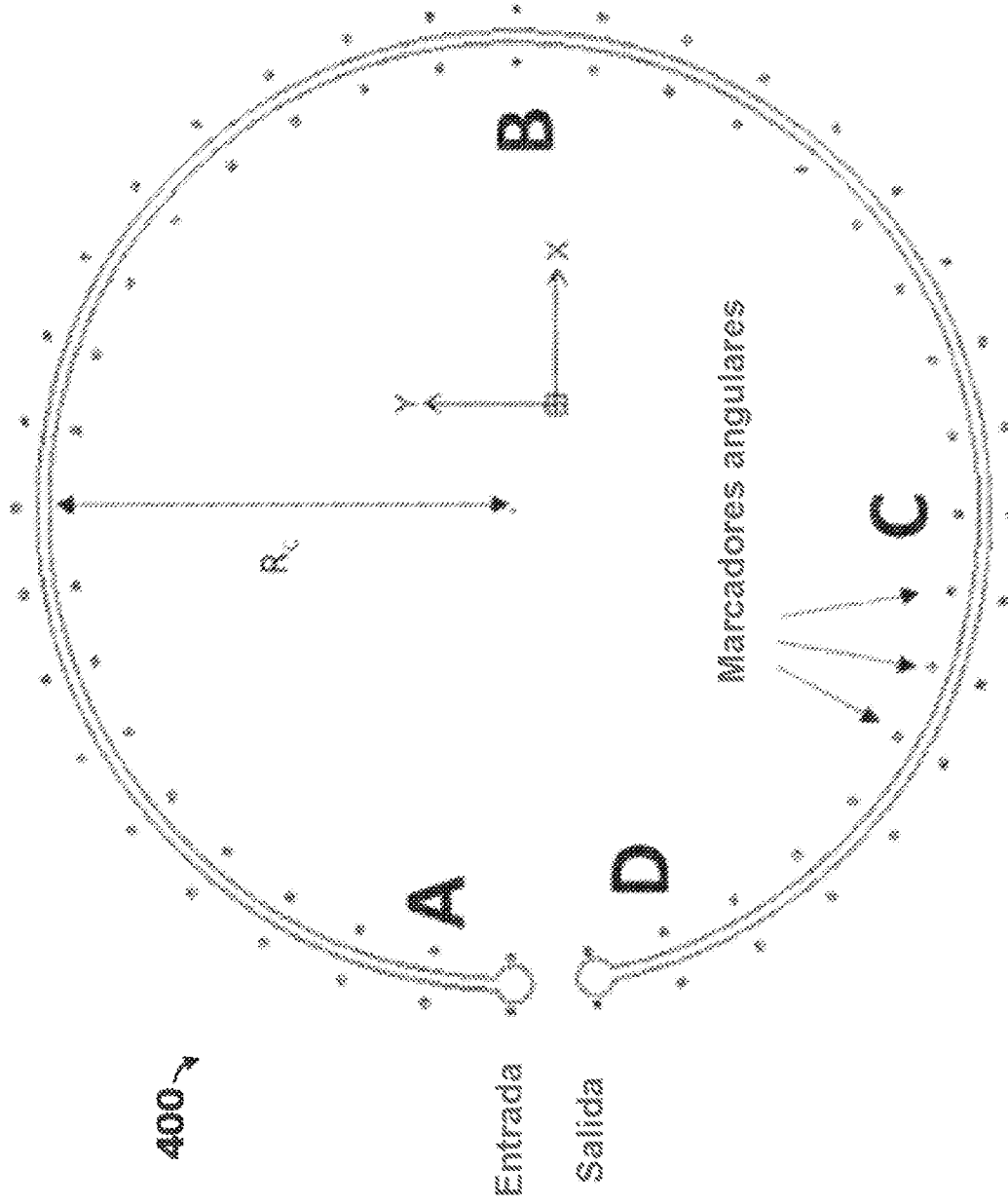


FIG. 14

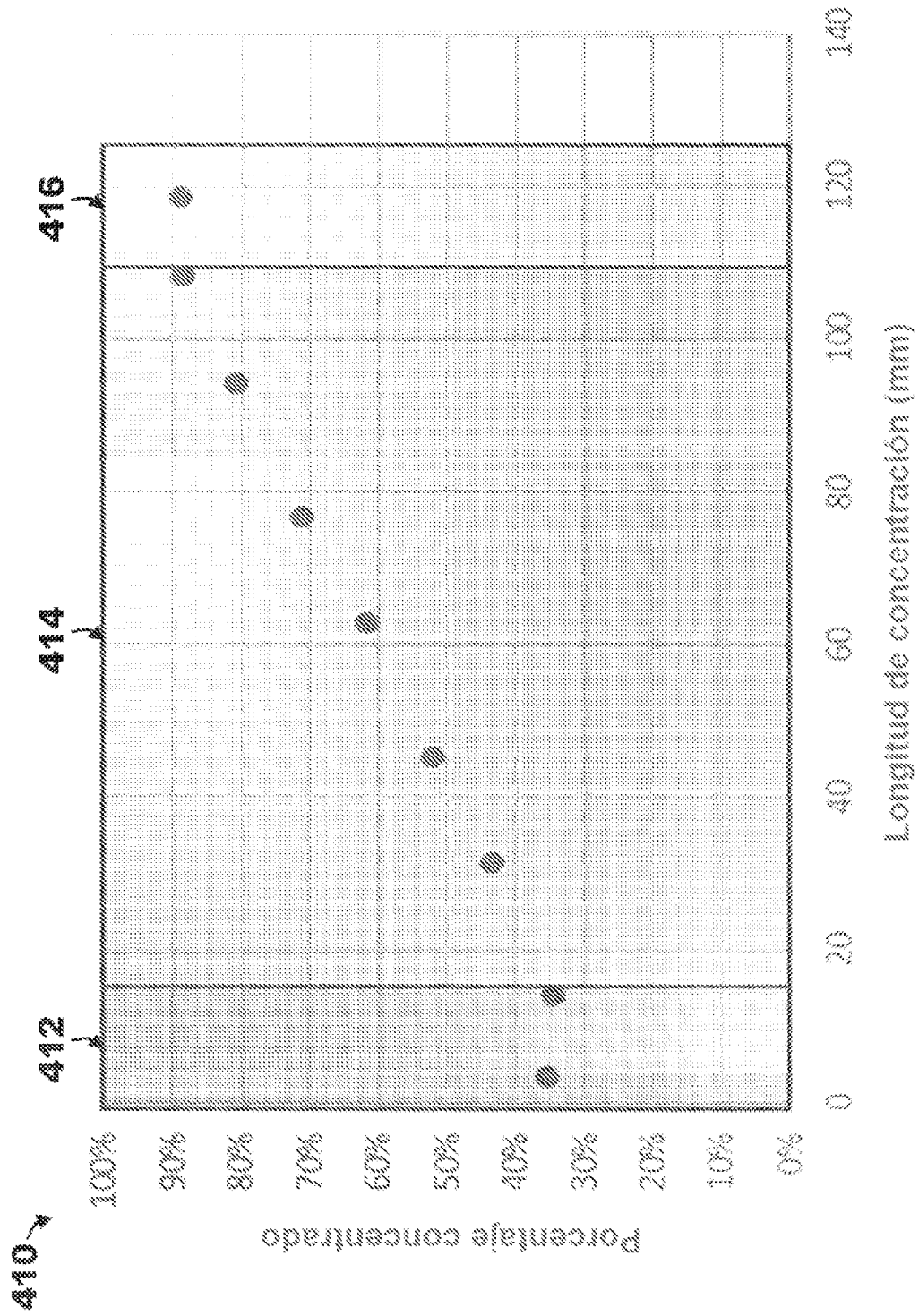


FIG. 15