

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 382 073**

51 Int. Cl.:

**G01F 1/74** (2006.01)

**G01F 1/708** (2006.01)

**G01F 1/712** (2006.01)

**G01F 1/66** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **03732047 .0**

96 Fecha de presentación: **23.01.2003**

97 Número de publicación de la solicitud: **1476727**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **17.11.2004**

54 Título: **Aparato y método para medir parámetros de una mezcla que tiene partículas sólidas suspendidas en un fluido que fluye en una tubería**

30 Prioridad:  
23.01.2002 US 351232 P  
26.02.2002 US 359785 P  
24.04.2002 US 375847 P  
12.11.2002 US 425436 P  
15.11.2002 US 426724 P

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**05.06.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**05.06.2012**

73 Titular/es:  
**CIDRA CORPORATE SERVICES, INC.  
50 BARNES PARK NORTH  
WALLINGFORD, CT 06492, US**

72 Inventor/es:  
**GYSLING, Daniel, L. y  
LOOSE, Douglas, H.**

74 Agente/Representante:  
**Martín Santos, Victoria Sofia**

ES 2 382 073 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Aparato y método para medir parámetros de una mezcla que tiene partículas sólidas suspendidas en un fluido que fluye en una tubería

5

### Referencia cruzada a solicitudes de patente relacionadas

Esta solicitud reivindica el beneficio de la Solicitud Provisional de Estados Unidos N° 60/351.232 (Cidra Docket N° CC-0410), presentada el 23 de enero de 2002; Solicitud Provisional de Estados Unidos N° 60/359.785 (Cidra Docket N° CC-0403), presentada el 26 de febrero de 2002; Solicitud Provisional de Estados Unidos N° 60/375.847 (Cidra Docket N° CC-0468), presentada el 24 de abril de 2002; Solicitud Provisional de Estados Unidos N° 60/425.436 (Cidra Docket N° CC-0538), presentada el 12 de noviembre de 2002; y Solicitud Provisional de Estados Unidos N° 60/426.724 (Cidra Docket N° CC-0554), presentada el 15 de noviembre de 2002, todas las cuales se incorporan en este documento por referencia en su totalidad.

10  
15

### Campo técnico

Esta invención se refiere a un aparato para medir el flujo que pasa dentro de una tubería y, más particularmente, a un aparato y método para medir la velocidad del sonido y/o alteraciones vorticiales que se propagan en el flujo, que tiene partículas suspendidas dentro de un fluido continuo, para determinar parámetros, tales como la proporción partícula/fluido, tamaño de partícula y caudal volumétrico del flujo en tuberías usando presiones acústicas y/o dinámicas.

20

### Técnica anterior

Esta invención proporciona un método para medir parámetros de una mezcla de fluido/partícula en una tubería que puede usarse en muchas aplicaciones, tales como en industrias químicas, farmacéuticas, del petróleo o de generación de energía. En particular, la invención proporciona un método para medir mezclas de carbón pulverizado y aire usadas en sistemas de suministro de combustible pulverizado en lugar de, en un gran porcentaje, calderas que funcionan con carbón usadas en la industria de generación de energía.

25

30

Actualmente, bastante por encima del 50% de la electricidad en Estados Unidos se genera con carbón. Aunque el carbón se considera eficaz respecto a costes, es un recurso abundante en Estados Unidos, el uso de carbón ha sido restringido debido en gran parte a preocupaciones medioambientales. Para mitigar este impacto, el Departamento de Energía de Estados Unidos y la industria de generación de energía tienen grandes programas diseñados para desarrollar tecnología para reducir los efectos medioambientales de la quema de carbón. Estas iniciativas de quema limpia del carbón incluyen tecnologías diseñadas para desarrollar mejoras en el proceso de combustión, para mejorar la eficacia mientras que reducen los contaminantes, tales como carbón sin quemar, cenizas y óxidos nitrosos (NOx).

35

40

La capacidad para medir el caudal y composición de la mezcla aire/carbón dentro de las tuberías de carbón es un aspecto importante de cualquier sistema o estrategia diseñada para optimizar el rendimiento del sistema de suministro de CP. La industria reconoce esto y, por lo tanto, ha desarrollado una amplia variedad de tecnologías para realizar esta medición. Estas incluyen dispositivos de muestreo y basados en sonda, así como medidores en tiempo real basados en una amplia variedad de tecnologías incluyendo cargas electrostáticas, microondas y ultrasonidos.

45

### Sumario de la invención

Los objetos de la presente invención incluyen proporcionar un sistema para medir la velocidad del sonido que se propaga a través de una mezcla de partícula/fluido en tuberías en sistemas de caldera que funcionan con carbón y procesos relacionados, por ejemplo, para determinar los parámetros particulares de la mezcla.

50

De acuerdo con la presente invención, un aparato para medir al menos un parámetro de una mezcla de partícula/fluido en una tubería incluye una serie espacial de al menos dos sensores de presión, dispuestos en diferentes localizaciones axiales a lo largo de la tubería. Cada uno de los sensores de presión mide una presión no estacionaria dentro de la tubería en una localización axial correspondiente. Cada uno de dichos sensores proporciona una señal de presión indicativa de la presión no estacionaria dentro de la tubería en dicha localización axial de uno de dichos sensores correspondiente. Un procesador de señales, sensible a dichas señales de presión proporciona una señal indicativa de al menos un parámetro de la mezcla en la tubería.

55

60

De acuerdo con la presente invención, un método para medir al menos un parámetro de una mezcla de partícula/fluido en una tubería incluye medir presiones no estacionarias dentro de la tubería, al menos en dos localizaciones de medición axial predeterminadas a lo largo de la tubería para proporcionar una señal de presión indicativa de la presión no estacionaria dentro de la tubería en cada una de al menos dos localizaciones de medición axial predeterminadas. Adicionalmente el método incluye calcular al menos un parámetro de la mezcla

65

partícula/fluido en la tubería usando la presión no estacionaria medida en las localizaciones de medición axial.

El anterior y otros objetos, características y ventajas de la presente invención resultarán más evidentes a la luz de la siguiente descripción detallada de las realizaciones ejemplares de las mismas.

5 **Breve descripción de los dibujos**

La Figura 1 es un diagrama de bloques de un caudalímetro para medir la velocidad del sonido de la mezcla fluido/partícula que fluye dentro de una tubería, de acuerdo con la presente invención.

10 La Figura 2 es un diagrama esquemático de un sistema de medición de parámetros de una mezcla de combustible pulverizado (CP)/aire dentro de un sistema de caldera que funciona con carbón, de acuerdo con la presente invención.

La Figura 3 es una fotografía aumentada que muestra el tamaño de partícula de carbón típico del sistema mostrado en la Figura 2.

15 La Figura 4 es una representación de la velocidad del sonido de una mezcla frente a la frecuencia en una proporción de flujo másico aire/carbón, de acuerdo con la presente invención.

La Figura 5 es una representación de datos reales y un modelo de la velocidad del sonido como una función de la frecuencia para mezclas aire/carbón de acuerdo con la presente invención.

20 La Figura 6 es una representación que muestra la desviación típica de la velocidad del sonido frente a la frecuencia para diversas series de un sistema de medición de parámetros de la mezcla CP/aire, de acuerdo con la presente invención.

La Figura 7 es una representación de la velocidad del sonido como una función de la frecuencia para mezclas aire/carbón con un tamaño de partícula fijo (50 mm) y una proporción en masa aire a combustible variable de acuerdo con la presente invención.

25 La Figura 8 es una representación de la velocidad del sonido como una función de la frecuencia para mezclas aire/carbón con tamaño de partícula variable donde la proporción en masa de aire a combustible es igual a 1,8 de acuerdo con la presente invención.

La Figura 9 es una representación de la velocidad del sonido como una función de la proporción aire/carbón de acuerdo con la presente invención.

30 La Figura 10 es un diagrama de flujo de un procedimiento de optimización empleado para determinar la proporción de aire a combustible y el tamaño de partícula a partir de un modelo analítico y una velocidad de dispersión determinada experimentalmente de los datos de sonido de acuerdo con la presente invención.

35 La Figura 11 es una representación de los resultados del procedimiento de optimización de la Figura 10 aplicados a los datos registrados desde una serie de sensores que escuchan un flujo en un conducto circular de 15,2 cm (seis pulgadas), tamaño de partícula 50  $\mu\text{m}$ , caudal de aire 30,5 m/s (100 pies/s) con una proporción de aire a combustible de 1,8.

La Figura 12 es una representación de los resultados del procedimiento de optimización de la Figura 10 aplicados a una serie de conjuntos de datos con una proporción de aire a combustible variable.

40 La Figura 13 es una representación kw de datos procesados a partir de una serie de sensores de presión usados para medir la velocidad del sonido de una mezcla de carbón/aire que fluye en una tubería, de acuerdo con la presente invención.

La Figura 14 es un diagrama de bloques de un caudalímetro para medir el campo vorticial de la mezcla de fluido/partícula que fluye dentro de una tubería, de acuerdo con la presente invención.

45 La Figura 15 es una vista en sección transversal de una tubería que muestra un perfil de velocidad de flujo de tubería turbulento.

La Figura 16 es una vista en alzado lateral de otra realización de caudalímetro para medir las alteraciones vorticiales en una tubería, de acuerdo con la presente invención.

La Figura 17 es una representación de las señales de presión medidas mediante un par de sensores de presión del caudalímetro de la Figura 16.

50 La Figura 18 es una representación de la correlación cruzada de las señales de presión representadas en la Figura 17.

La Figura 19 es una representación kw de los datos procesados a partir de un caudalímetro que representa la presente invención que ilustra la pendiente de la cresta convectiva, y una representación de la función de optimización de la cresta convectiva, de acuerdo con la presente invención.

55 La Figura 20 es una vista en alzado lateral de una pluralidad de sensores de presión, que tienen PVDF, sujetos a la superficie exterior de la tubería, de acuerdo con la presente invención.

La Figura 21 es una vista en perspectiva parcial de uno de los sensores de presión de la Figura 20.  
1 pie = 0,305 m

60 **Mejor modo para realizar la invención**

Haciendo referencia a las Figuras 1 y 14, se proporciona un caudalímetro 10,70 que representa la presente invención que mide un número de parámetros/características de una mezcla 12 de partículas sólidas suspendidas dentro de un fluido que fluye continuamente dentro de una tubería o conducto 14, en el que un fluido está definido como un líquido y/o un gas. El caudalímetro puede estar configurado y programado para medir la velocidad del sonido que se propaga a través de la mezcla o para medir las alteraciones vorticiales que se propagan a través de la

mezcla. En algunos casos, el caudalímetro 10 puede estar configurado para medir tanto la velocidad del sonido como las alteraciones vorticiales. Dependiendo de la configuración o la realización, el caudalímetro puede medir al menos uno de los siguientes parámetros del flujo de mezcla 12: la concentración de fluido/partícula (fracción en fase volumétrica), el caudal volumétrico, el tamaño de las partículas sólidas, el flujo másico de la mezcla y la velocidad de la mezcla. Para determinar uno cualquiera de estos parámetros, el caudalímetro 10,70 mide las presiones no estacionarias creadas por la velocidad del sonido (SOS) y/o las alteraciones vorticiales que se propagan a través de la mezcla que fluye en la tubería 14, que se describirán con mayor detalle posteriormente en este documento.

Las partículas sólidas de la mezcla 12 pueden ser de cualquier tamaño, forma y material. Por ejemplo, las partículas pueden ser de pequeño tamaño, como en una forma de polvo, en una forma granular o de mayor tamaño. El caudalímetro 10,70 puede usarse en cualquier aplicación que lleve partículas sólidas suspendidas en un fluido a través de una tubería, tal como en aplicaciones químicas, farmacéuticas, del petróleo y de generación de energía. Por ejemplo, la presente invención es bastante adecuada para medir los parámetros (por ejemplo, proporción aire/carbón, tamaño de partícula) para sistemas de generación de energía que usan carbón pulverizado para prender el horno de un sistema de caldera de vapor.

Como un ejemplo, la presente invención se analizará en el contexto de un sistema de suministro de combustible pulverizado (CP) para generación de energía, aunque se apreciará que el caudalímetro puede aplicarse a cualquier número de otras aplicaciones, como se analiza posteriormente en este documento. Un sistema de suministro de CP 1 representativo se muestra en un sistema 2 de caldera que funciona con carbón en la Figura 2. El carbón se pulveriza en un molino 3 y se atrapa en el aire producido por muchos medios tales como un ventilador 4 para transportar la mezcla CP/aire a través de tuberías 12 para suministrarla al horno 6. Los hornos típicos pueden tener >50 tuberías de carbón, cada una de 30,5-50,8 m (12,20 pulgadas) de diámetro. Típicamente, una caldera de una instalación grande de >300 Mw, puede tener 4-11 molinos de pulverización alimentando el horno. La capacidad del sistema de suministro de CP para suministrar la cantidad apropiada de combustible y aire al horno a través de estas múltiples tuberías de carbón, tanto colectiva como individualmente, tiene una fuerte influencia sobre el rendimiento y las emisiones desde la caldera que funciona con carbón.

Como se sabe, las no uniformidades en el sistema de suministro de CP 1 pueden dar como resultado la variación de las proporciones de combustible a aire, provocando puntos calientes, regiones de alta generación de NOx y combustible sin quemar. La conexión entre el rendimiento de un sistema 1 de suministro de combustible CP y un sistema de caldera 2 está bien reconocido. El caudalímetro 10 que representa la presente invención es capaz de medir la proporción de combustible a aire y el tamaño de partícula del carbón pulverizado proporcionado al horno para, de esta manera, proporcionar retroalimentación al operario para proporcionar una combustión más eficaz del carbón.

Como se ha descrito anteriormente en este documento, el caudalímetro 10,70 de la presente invención puede estar configurado y programado para medir y procesar las presiones no estacionarias detectadas  $P_1(t) - P_N(t)$  creadas por las ondas acústicas y/o alteraciones vorticiales que se propagan a través de la mezcla para determinar parámetros del flujo de mezcla 12. Uno de estos caudalímetros 10 se muestra en la Figura 1 que mide la velocidad del sonido (SOS) de ondas de sonido unidimensionales que se propagan a través de la mezcla de fluido/partícula para determinar la composición de la mezcla, en concreto la proporción líquido/partícula de la mezcla. El caudalímetro también es capaz de determinar el tamaño de partícula de las partículas, la velocidad de la mezcla y el caudal volumétrico de la mezcla. Se sabe que el sonido se propaga a través de diversos medios a diversas velocidades en campos tales como los campos SONAR y RADAR. La velocidad del sonido de una mezcla dentro de una tubería 14 puede determinarse usando un número de técnicas conocidas, tales como aquellas expuestas en la Solicitud de Patente de Estados Unidos con N° de Serie 09/344,094, titulada "Fluid Parameter Measurement in Pipes Using Acoustic Pressures", presentada el 25 de junio de 1999 y la Solicitud de Patente de Estados Unidos con N° de Serie 10/007.749, titulada "Fluid Parameter Measurement in Pipes Using Acoustic Pressures", presentada el 7 de noviembre de 2001, cada una de las cuales se incorpora en este documento por referencia. La presente invención utiliza, al menos, un caudalímetro 10 para determinar los diversos parámetros de la mezcla líquido/partícula, en el que uno de los parámetros es la velocidad a la que el sonido viaja dentro de la mezcla en el sistema de tubería, como se describirá más completamente en este documento más adelante.

De acuerdo con la presente invención, la velocidad del sonido que se propaga a través de la mezcla 12 se mide escuchando de forma pasiva el flujo con una serie de sensores de presión no estacionaria para determinar la velocidad a la que las ondas de compresión unidimensionales se propagan a través de una mezcla líquido/partícula contenida dentro de la tubería 14.

Como se muestra en la Figura 1, el caudalímetro 10 tiene una serie de al menos tres sensores de presión acústica 15, 16, 17 localizados en tres localizaciones  $x_1, x_2, x_3$  axialmente a lo largo de la tubería 14. Se apreciará que la serie de sensores puede incluir más de tres sensores de presión como se representa por el sensor de presión 18 en la localización  $x_N$ . La presión generada por las ondas acústicas puede medirse a través de los orificios en la tubería 14 con orificios a los sensores de presión externos 15-18 o mediante otras técnicas analizadas posteriormente en este documento. Los sensores de presión 15-18 proporcionan señales de presión variables con el tiempo  $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_N(t)$  en las líneas 20, 21, 22, 23 hasta una unidad de procesamiento de señales 30 hasta la lógica

conocida de Transformada de Fourier Rápida (FFT) 26, 27, 28, 29, respectivamente. La lógica FFT 26 - 29 calcula la transformada de Fourier de las señales de entrada basadas en tiempo  $P_1(t) - P_N(t)$  y proporciona señales complejas del dominio de frecuencia (o basadas en frecuencia)  $P_1(w), P_2(w), P_3(w), P_N(w)$  en las líneas 32, 33, 34, 35 indicativas del contenido de frecuencia de las señales de entrada. En lugar de las FFT, puede usarse cualquier otra técnica para obtener las características de dominio de frecuencia de las señales  $P_1(t) - P_N(t)$ . Por ejemplo, la densidad espectral cruzada y la densidad espectral de potencia pueden usarse para formar funciones de transferencia de dominio de frecuencia (o respuestas o proporciones de frecuencia) analizadas posteriormente en este documento.

Las señales de frecuencia  $P_1(w) - P_N(w)$  se alimentan a una Lógica de Cálculo 38  $a_{mezcla}$ -Mx que proporciona una señal a la línea 40 indicativa de la velocidad del sonido de la mezcla  $a_{mezcla}$  (analizada más en detalle posteriormente en este documento). La señal  $a_{mezcla}$  se proporciona al mapa (o ecuación) lógica 42, que convierte  $a_{mezcla}$  en una composición porcentual de la mezcla CP/aire y proporciona un %Comp de la señal a la línea 44, indicativo de la misma (como se analiza posteriormente en este documento). También, si el número de Mach Mx no es insignificante y se desea, la lógica de cálculo 40 puede proporcionar también una señal Mx a la línea 46 indicativa del número de Mach Mx.

Más específicamente, para ondas acústicas unidimensionales planas en una mezcla homogénea, se sabe que el campo de presión acústica  $P(x, t)$  en una localización x a lo largo de una tubería, donde la longitud de onda  $\lambda$  de las ondas acústicas a medir es larga, en comparación con el diámetro de la tubería 12 (es decir,  $\lambda/d \gg 1$ ), puede expresarse como una superposición de una onda que se desplaza hacia la derecha y una onda que se desplaza hacia la izquierda, como sigue:

$$P(x, t) = \left( A e^{-ik_r x} + B e^{+ik_l x} \right) e^{i\omega t} \quad \text{Ec. 1}$$

donde A, B son las amplitudes complejas basadas en frecuencia de las ondas que se desplazan a derecha e izquierda, respectivamente, x es la localización de la medición de presión a lo largo de una tubería,  $\omega$  es la frecuencia (en rad/s, donde  $\omega = 2\pi f$ ) y  $k_r, k_l$  son números de onda para las ondas que se desplazan a derecha e izquierda, respectivamente, que se definen como:

$$k_r \equiv \left( \frac{\omega}{a_{mezcla}} \right) \frac{1}{1 + M_x} \quad \text{y} \quad k_l \equiv \left( \frac{\omega}{a_{mezcla}} \right) \frac{1}{1 - M_x} \quad \text{Ec. 2}$$

donde  $a_{mezcla}$  es la velocidad del sonido de la mezcla en la tubería,  $\omega$  es la frecuencia (en rad/s) y  $M_x$  es el número de Mach axial del flujo de la mezcla dentro de la tubería, donde:

$$M_x \equiv \frac{V_{mezcla}}{a_{mezcla}} \quad \text{Ec. 3}$$

donde  $V_{mezcla}$  es la velocidad axial de la mezcla. Para mezclas no homogéneas, el número de Mach axial representa la velocidad media de la mezcla y la descripción de cambio acústico de baja frecuencia permanece sustancialmente sin alterar.

Los datos de la serie de sensores pueden procesarse en cualquier dominio, incluyendo el dominio frecuencia/espacial, el dominio temporal/espacial, el dominio temporal/número de onda o el dominio número de onda/frecuencia ( $k-\omega$ ). De esta manera, puede usarse cualquier serie conocida de técnicas de procesamiento en cualquiera de estos u otros dominios relacionados, si se desea.

También, algunas o todas las funciones dentro de la unidad de procesamiento de señales 30 pueden implementarse en un software (usando un microprocesador u ordenador) y/o firmware, o pueden implementarse usando un hardware analógico y/o digital, que tiene suficiente memoria, interfaces y capacidad para realizar las funciones descritas en este documento.

Los sensores de presión acústica 15-18 detectan señales de presión acústica que, como se mide, son señales de menor frecuencia (y mayores longitudes de onda) que aquellas usadas para caudalímetros ultrasónicos de la técnica anterior y, de esta manera, la presente invención es más tolerante con las faltas de homogeneidad en el flujo, tal como espesamiento, y otras faltas de homogeneidad en el dominio del tiempo y el espacio dentro del flujo, incluso donde la acumulación o "espesamiento" de carbón es improbable, tal como después de un codo. El término "espesamiento" es un término conocido por los expertos en esta materia que representa una forma de dividir la mala distribución espacial y temporal inducida en flujos de mezcla con densidades de componentes ampliamente diferentes. Es una condición donde una gran porción del flujo de carbono está en una banda situada a lo largo de un lado de la tubería 14.

Además, la presente invención incorpora la adaptabilidad de la tubería 14 para determinar la velocidad eficaz del sonido del sistema de mezcla tubería/CP/aire. Las señales de presión acústica  $P_1(t) - P_N(t)$  se generan dentro de la

mezcla CP/aire de la tubería 14 mediante una diversidad de fuentes no discretas, tales como maquinaria remota molinos, ventiladores 4 (Figura 2), válvulas, codos, así como el propio flujo de mezcla CP/aire. Es esta última fuente, la mezcla CP/aire 12, la que fluye dentro de la tubería 14, que es un fuente genérica de ruido acústico que asegura un nivel mínimo de acústica para cualquier sistema de tubería para mezcla CP/aire para el que la presente invención supone una ventaja única. La acústica generada por el flujo aumenta con la velocidad de flujo media y los niveles de ruido globales (niveles de presión acústica) son una función del mecanismo de generación y el mecanismo de amortiguación. De esta manera, no se requiere una fuente discreta de ruido externa dentro de la presente invención y, de esta manera, puede funcionar usando una escucha pasiva. Aunque el caudalímetro 10 escucha pasivamente el flujo de mezcla 12, la presente invención contempla la adición de una fuente acústica para inyectar una onda acústica deseada en un flujo a medir, tal como por compresión, vibración y/o golpeteo a la tubería, por nombrar algunos ejemplos.

Para ciertos tipos de sensores de presión, por ejemplo, sensores de tensión de tubería, acelerómetros, sensores de velocidad o sensores de desplazamiento, analizados posteriormente en este documento, puede ser deseable que la tubería 14 presente una cierta cantidad de adaptabilidad de tubería.

Como alternativa, para minimizar cualquier efecto de error (y la correspondiente necesidad de calibración) provocado por la adaptabilidad de la tubería, la sección de ensayo axial 50 de la tubería 14 a lo largo de donde están localizados los sensores 15-18, puede hacerse tan rígida como sea posible. Para conseguir la rigidez deseada, el espesor de la pared de la sección de ensayo 50 puede hacerse que tenga un espesor predeterminado, o la sección de ensayo 50 puede hacerse de un material muy rígido, por ejemplo, acero, titanio, Kevlar®, cerámico u otro material con un alto módulo.

Está dentro del alcance de la presente invención que el espaciado entre los sensores de presión puede ser conocido o arbitrario, y que se requieren tan pocos como dos sensores si se conoce cierta información sobre las propiedades acústicas del sistema de tubería de mezcla CP/aire. Los sensores de presión están separados suficientemente de manera que toda la longitud de la serie (apertura) es al menos una fracción significativa de la longitud de onda medida de las ondas acústicas que se están midiendo. Como se describirá con mayor detalle, la longitud de onda acústica a medir es una función de, al menos, el tamaño y la masa de las partículas, y la viscosidad del fluido. Cuanto mayor sea el tamaño y la masa de las partículas y/o menor la viscosidad del fluido, mayor será el espaciado necesario de los sensores. A la inversa, cuando menor sea el tamaño y la masa de las partículas y/o más viscoso sea el fluido, más corto será el espaciado necesario de los sensores.

Como se ha analizado, el caudalímetro 10 mide la velocidad del sonido de ondas de sonido unidimensionales que se propagan a través de una mezcla fluido/partícula para determinar la composición de la mezcla. Específicamente, la velocidad del sonido que se propaga a través de mezclas diluidas de sólido/aire puede relacionarse directamente con las partículas de la fracción másica del flujo. Un sistema 1 de suministro de combustible CP típico puede operar con una proporción en masa de aire a combustible de 1,5 a 2,5. Típicamente, el sistema de suministro de CP funciona con una proporción en masa de aire a carbón de 1,5 a 2,5 con una densidad de carbón de 1200 a 1400 kg/m<sup>3</sup> en comparación con 1,2 kg/m<sup>3</sup> para el aire en condiciones atmosféricas convencionales. De esta manera, satisfaciendo la proporción en masa deseada da como resultado una mezcla muy diluida de carbón en una base volumétrica, del orden de una parte en 1000 en volumen.

Suponiendo que las partículas de carbón son suficientemente pequeñas y que las frecuencias acústicas y las frecuencias de las perturbaciones asociadas con la acústica son suficientemente bajas para que las partículas sólidas presenten un deslizamiento insignificante (tanto estacionario como no estacionario), puede suponerse que la velocidad del sonido no es dispersiva (es decir, que es constante con la frecuencia) y la fracción de fase volumétrica de la mezcla podría determinarse mediante la ecuación de Wood:

$$\rho_{mezcla} = \sum_{i=1}^N \phi_i \rho_i$$

$$\frac{1}{\rho_{mezcla} a_{mezcla}^2} = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_i}{\rho_i a_i^2}$$

$$\sum_{i=1}^N \phi_i = 1$$

Incluyendo el efecto de la adaptabilidad introducido por el conducto 12 (en este caso una tubería circular de módulo E, radio R y espesor de pared t)

$$\frac{1}{\rho_{mezcla} a_{medido}^2} = \frac{1}{\rho_{mezcla} a_{mezcla}^2} + \sigma \text{ donde } \sigma \equiv \frac{2R}{Et}$$

Utilizando las relaciones anteriores, la velocidad a la que el sonido se desplaza dentro del sistema de tuberías de una mezcla de carbón/aire representativa se muestra en la Figura 4 como una función de la proporción en masa aire/carbón. Para este ejemplo, se supone que el aire puro tiene una densidad de 1,2 kg/m<sup>3</sup> y una velocidad del sonido de 365,9 m/s y se supone que el carbón tiene una densidad de 1400 kg/m<sup>3</sup> y una velocidad del sonido de 2439 m/s. Como se muestra, el efecto de aumentar la fracción de carbón, es decir, disminuir la proporción aire/carbón significa disminuir la velocidad del sonido. Físicamente, añadir partículas de carbón carga eficazmente la masa de la mezcla, aunque no cambia apreciablemente la compresibilidad del aire. En el intervalo de parámetros de interés, la relación entre la velocidad del sonido de la mezcla y la proporción aire/carbón se comporta bien y es monoatómica.

Aunque las curvas de calibración basadas en predicciones a partir de los primeros principios son alentadoras, el uso de datos empíricos para mapeo a partir de la velocidad del sonido a la proporción aire/carbón puede dar como resultado una precisión mejorada de la presente invención para medir las fracciones de aire/carbón de la mezcla.

Sin embargo, se ha descubierto que las propiedades físicas de las mezclas pulverizadas de carbón/aire generalmente son tales que habrá un deslizamiento de velocidad a todas las frecuencias excepto a las muy bajas (del orden de <1-2 Hz para partículas de carbón nominalmente de 50 µm en aire).

La Figura 5 muestra la velocidad medida del sonido como una función de la frecuencia para una mezcla real de carbón/aire 12. La velocidad del sonido se midió utilizando técnicas de escucha pasivas de la presente invención como se describe en este documento. La dependencia de la frecuencia de la velocidad del sonido se determinó aplicando un algoritmo de procesamiento de serie de Capon a múltiples intervalos de frecuencia estrechos entre 50-300 Hz, determinando de esta manera una velocidad de propagación acústica específica de la frecuencia. En este ejemplo particular, se obtuvieron datos en los que la mezcla carbón/aire fluía nominalmente a 30,5 m/s (100 pies/s) con una proporción en masa de aire a carbón igual a 1,8. Las partículas de carbón eran nominalmente de 50 µm de tamaño, representativo del carbón pulverizado usado típicamente en la generación de polvo y otras aplicaciones industriales. En la Figura 3 se muestra una vista aumentada de las partículas de carbono que se usaron para este ensayo.

En la Figura 5 se muestra adicionalmente el aumento de la velocidad del sonido con el aumento de la frecuencia y las asíntotas hacia un valor constante. La asíntota de la velocidad del sonido a mayor frecuencia es esencialmente la velocidad del sonido del aire solo que sin influencia de las partículas suspendidas. También, es evidente que la velocidad del sonido de la mezcla carbón/aire no ha alcanzado el límite casi estacionario a la menor frecuencia para la que se midió la velocidad del sonido. La velocidad del sonido continuó disminuyendo al menor límite de frecuencia. Un descubrimiento importante de la presente invención es que la velocidad a la que el sonido se propaga a través de las partículas diluidas suspendidas en un fluido continuo se dice que es dispersiva. Como se define en este documento, la velocidad a la que las ondas acústicas se propagan a través de las mezclas dispersivas varía con la frecuencia.

Medir la velocidad del sonido de una mezcla 12 progresivamente a frecuencias cada vez menores y menores se hace inherentemente menos preciso a medida que la longitud total de la serie de sensores de presión 15 - 18 ( $\Delta x_{apertura}$ ), que define la apertura de la serie, se hace más pequeña en comparación con la longitud de onda de la acústica. En general, la abertura debería ser al menos una fracción significativa de una longitud de onda de la velocidad del sonido de interés. En una realización particular, los datos de velocidad del sonido se registraron con una serie de cuatro sensores, separados 30,5 cm (12 pulgadas), para una apertura total de 91,4 cm (tres pies). A 50 Hz, una onda de sonido a 305 m/s (1000 pies/s) tiene una longitud de onda de 6,10 m (20 pies). De esta manera, la apertura de esta serie particular (aproximadamente 92 cm (0,36 pulgadas) se extendía solo 3/20 veces de una longitud de onda, y la capacidad de la serie para resolver con precisión las velocidades de sonido por debajo de la misma está claramente afectada. Es un aspecto importante de la presente invención que la capacidad de resolver la velocidad de sonido a bajas frecuencias esté directamente relacionada con la apertura de la serie. En consecuencia, se usan series más grandes para resolver velocidades del sonido a menores frecuencias. Como se muestra en la Figura 6, la desviación típica asociada con la determinación de la velocidad del sonido en aire se muestra como una función de la frecuencia para tres series de apertura variable, en concreto 0,46 m; 0,91 m; 3,05 m (1,5 pie, 3 pies y 10 pies).

Dadas las restricciones prácticas en la medición precisa de velocidades del sonido a frecuencias ultrabajas, los datos sugieren que utilizar un modelo casi estacionario para interpretar la relación entre la velocidad del sonido, medida a frecuencias por encima de aquellas en las que el modelo casi estacionario es aplicable y la proporción aire a combustible sería problemático y, de hecho, sería poco práctico. De esta manera, la clave para entender e interpretar la composición de las mezclas de carbón/aire a través de mediciones de la velocidad del sonido está en

las características dispersivas de la mezcla carbón/aire.

De acuerdo con la presente invención, la naturaleza dispersiva del sistema utiliza primeros principios del modelo de interacción entre el aire y las partículas. Este modelo se visualiza como representativo de una clase de modelos que pretenden buscar los efectos dispersivos. Podrían usarse otros modelos para tener en cuenta los efectos dispersivos sin alterar la intención de esta divulgación (por ejemplo, véase el documento titulado "Viscous Attenuation of Acoustic Waves in Suspension" de R. L. Gibson, Jr. y M. N. Toksóz), que se incorpora en este documento por referencia. El modelo permite el deslizamiento entre la velocidad local de la fase fluida continua y la de las partículas. La fuerza de arrastre de las partículas por el fluido continuo está modelada por una fuerza proporcional a la diferencia entre la velocidad de fluido local y la de las partículas de fluido y está equilibrada por la fuerza inercial:

$$F_{\text{arrastre}} = K(U_f - U_p) = \rho_p v_p \frac{\partial U_p}{\partial t}$$

donde K = constante de proporcionalidad,  $U_f$  = velocidad del fluido,  $U_p$  = velocidad de partícula,  $\rho_p$  = densidad de partícula y  $v_p$  = volumen de partícula. El efecto de la fuerza sobre la fase fluida continua mediante las partículas fluidas está modelado como un término de fuerza en la ecuación de momento axial. La ecuación de momento axial para un volumen controlada del área A y la longitud  $\Delta x$  se da mediante:

$$P_x - P_{x+\Delta x} - K(U_f - U_p) \left\{ \frac{\phi_p \Delta x}{v_p} \right\} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f U_f \Delta x)$$

donde P = presión en las localizaciones x y  $\Delta x$ ,  $\phi_p$  = fracción en volumen de las partículas,  $\rho_f$  = densidad del fluido. La fuerza de arrastre de la partícula se da mediante:

$$F_{\text{arrastre}} = K(U_f - U_p) = C_d A_p \frac{1}{2} \rho_f (U_f - U_p)^2$$

donde  $C_d$  = coeficiente de arrastre,  $A_p$  = área frontal de la partícula y  $\rho_f$  = densidad de fluido. Usando la ley de Stokes para el arrastre en una esfera a un número de Reynold bajo da el coeficiente de arrastre como:

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\mu}{\rho_f (U_f - U_p) D_p}$$

donde  $D_p$  = diámetro de partícula y  $\mu$  = viscosidad del fluido. Resolviendo para K en este modelo produce:

$$K = 3\pi\mu D_p$$

Usando las relaciones anteriores y técnicas de modelado acústico unidimensionales, puede deducirse la siguiente relación para el comportamiento dispersivo de una mezcla de partículas de fluido idealizada.

$$a_{\text{mezcla}}(\omega) = a_f \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\phi_p \rho_p}{\rho_f \left( 1 + \omega^2 \frac{\rho_p^2 v_p^2}{K^2} \right)}}$$

En la relación anterior, la SOS del fluido, densidad ( $\rho$ ) y viscosidad ( $\phi$ ) son aquellas de la fase fluida pura,  $v_p$  es el volumen de las partículas individuales y  $\phi_p$  es la fracción de fase volumétrica de las partículas en la mezcla.

Dos parámetros de interés fundamental en las mediciones de carbón pulverizadas son el tamaño de partícula y la proporción en masa de aire a combustible. Para esto, es interesante examinar las características dispersivas de la mezcla como una función de estas dos variables. Las Figuras 7 y 8 muestran el comportamiento dispersivo para mezclas carbón/aire con parámetros típicos para aquellos usados en los sistemas de suministro de carbón pulverizado.

En particular la Figura 7 muestra el comportamiento predicho para un carbón con un tamaño nominal de 50  $\mu\text{m}$  en aire para un intervalo de proporciones de aire a combustible. Como se muestra, el efecto de la proporción de aire a

combustible está bien definido en el límite de baja frecuencia. Sin embargo, el efecto de la proporción de aire a combustible se hace indistinguible a mayores frecuencias, aproximándose a la velocidad del sonido del aire puro a altas frecuencias (por encima de ~100 Hz).

5 Análogamente, la Figura 8 muestra el comportamiento predicho para una mezcla de carbón/aire con una proporción de aire a combustible de 1,8, con un tamaño de partícula variable. Esta figura ilustra que el tamaño de partícula no tiene influencia sobre la velocidad del sonido en el límite de baja frecuencia (casi estacionario), ni sobre la velocidad del sonido en el límite de alta frecuencia. Sin embargo, el tamaño de partícula no tiene un efecto pronunciado en la región de transición.

10 Las Figuras 7 y 8 ilustran un aspecto importante de la presente invención. En concreto, que las propiedades dispersivas de mezclas diluidas de partículas suspendidas en un fluido continuo pueden clasificarse, en líneas generales, en tres regímenes de frecuencia: intervalo de frecuencia baja, intervalo de frecuencia alta y un intervalo de frecuencia de transición. Aunque el efecto del tamaño de partícula y la proporción de aire a combustible están interrelacionados, el efecto predominante de la proporción de aire a combustible es determinar el límite a baja frecuencia de la velocidad del sonido a medir y el efecto predominante del tamaño de partícula es determinar el intervalo de frecuencia de las regiones de transición. A medida que aumenta el tamaño de partícula, disminuye la frecuencia a la que aparecen las propiedades dispersivas. Para aplicaciones de carbón pulverizado típicas, esta región de transición empieza aproximadamente a frecuencias bajas, ~2Hz para partículas de un tamaño de 50 μm.

20 En el régimen de baja frecuencia, las partículas presentan un deslizamiento insignificante con el fluido. El intervalo de frecuencia para el que es válida una aproximación casi estacionaria, sin deslizamiento, es una función de una diversidad de parámetros que incluyen el tamaño de partícula, la viscosidad de fase continua, la forma de la partícula y la densidad de la partícula.

25 La velocidad del sonido casi estacionaria está dada por el límite de baja frecuencia de la relación anterior, donde AFR es la proporción de aire a combustible:

$$a_{mezcla}(\omega \rightarrow 0) = a_f * \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\varphi_p \rho_p}{\rho_f}}} \cong a_f * \sqrt{1 + \frac{1}{AFR}}$$

30 Obsérvese que el tamaño de partícula no afecta al límite de baja frecuencia de la velocidad del sonido. Haciendo referencia a la Figura 9, la velocidad del sonido se midió usando una realización de la presente invención que tenía ocho sensores separados por 52 cm (20,5 pulgadas), con un promedio de 20-40 Hz, para un intervalo de proporciones en masa aire a carbón. También se presentó la velocidad del sonido predicha para las mezclas carbón/aire usando el modelo casi estacionario. Como se muestra, aunque la tendencia general es capturada, es decir, la velocidad del sonido disminuye con el aumento de la carga de carbón, el error es significativo, haciendo que un primer principio de interpretación, basado en el modelo casi estacionario, sea inadecuado.

40 En el límite de alta frecuencia, la relación de dispersión predice la velocidad del sonido con una asíntota hacia la velocidad del sonido del fluido puro.

$$a_{mezcla}(\omega \Rightarrow \infty) = a_{fluido}$$

Es interesante destacar que el límite de alta frecuencia es independiente tanto del tamaño de partícula como de la proporción de aire a combustible.

45 Dadas las dificultades para medir frecuencias suficientemente bajas para aplicar el modelo casi estacionario y reconociendo que la velocidad del sonido de alta frecuencia no contiene información directa sobre el tamaño de partícula o la proporción aire a combustible, resulta evidente que las características de dispersión de la mezcla carbón/aire deberían utilizarse para determinar el tamaño de partícula y la proporción aire a combustible basándose en las mediciones de la velocidad del sonido.

50 Como se ha descrito anteriormente en este documento, el caudalímetro 10 de la presente invención incluye la capacidad de determinar con precisión el tamaño de partícula medio del carbón en la mezcla CP/aire dentro de la tubería 14 y la proporción de aire a combustible. No se proporciona un deslizamiento apreciable entre el aire y el tamaño de carbón sólido, la propagación de una onda de sonido unidimensional a través de mezclas multifase está influida por la masa eficaz y la compresibilidad eficaz de la mezcla. Para un sistema de transporte de aire, el grado al que se aplica la suposición de no deslizamiento es una función fuerte del tamaño de partícula y la frecuencia. En el límite de las partículas pequeñas y baja frecuencia, la suposición de no deslizamiento es válida. A medida que aumenta el tamaño de las partículas y que aumenta la frecuencia de las ondas del sonido, la suposición de no deslizamiento resulta ser cada vez menos válida. Para un tamaño de partícula de carbón medio, el aumento en el deslizamiento con la frecuencia provoca dispersión o, en otras palabras, la velocidad del sonido de la mezcla

cambiará con la frecuencia. Con una calibración apropiada, las características dispersivas de una mezcla proporcionarán una medición del tamaño de partícula medio, así como una proporción de aire a combustible (proporción partícula/fluido) de la mezcla.

- 5 Usando el modelo descrito anteriormente, que produce la ecuación mostrada a continuación, y la velocidad del sonido determinada experimentalmente como una función de la frecuencia, la presente invención incluye un procedimiento de optimización para determinar simultáneamente tamaño de partícula y AFR en mezclas de carbón/aire:

$$a_{mezcla}(\omega) = a_f \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\varphi_p \rho_p}{\rho_f \left(1 + \omega^2 \frac{\rho_p^2 v_p^2}{K^2}\right)}}$$

- 10 Haciendo referencia a la Figura 10 se muestra un procedimiento de optimización de acuerdo con la presente invención en el que los parámetros libres de un modelo analítico se optimizan para minimizar una función de error. Para fines de ilustración, la función de error utilizada es la suma de las diferencias de las velocidades del sonido entre un modelo analítico y la velocidad del sonido determinada experimentalmente como una función de la frecuencia:

$$err = \sum_{f=f_{baja}}^{f=f_{alta}} (a(f)_{modelo} - a(f)_{medida})^2$$

- 20 En la Figura 11 se muestran los resultados del procedimiento de optimización aplicados a los datos registrados a partir de una serie de sensores que escuchan el flujo en un conducto circular de 15,2 cm (seis pulgadas), un tamaño de partícula 50  $\mu\text{m}$ , un caudal de aire de 30,5 m/s (100 pies/s) con una proporción de aire a combustible a 1,8. Se muestra la velocidad del sonido medida y predicha por el modelo optimizado. Como se muestra, el modelo captura bien el intervalo de frecuencia de traslación y proporciona una buena estimación de la proporción de aire a combustible.

- 25 Los resultados del procedimiento de optimización aplicados a una serie de conjuntos de datos con una proporción variable de aire combustible se muestran en la Figura 12. Obsérvese para esta optimización que el tamaño de partícula se mantuvo constante sobre un intervalo de conjuntos de datos.

- 30 Además de medir la proporción de fluido a partícula de la mezcla 12 y el tamaño de partícula dentro de una tubería 14 usando la velocidad del sonido medida, el caudalímetro 14 incluye adicionalmente la capacidad de medir el caudal volumétrico de la mezcla por comparación de la diferencia de la velocidad de las ondas de sonido unidimensionales que se propagan con y contra el flujo medio.

- 35 Este método de determinación del caudal volumétrico de la mezcla de partícula/fluido 12 dentro de la tubería 12 depende de la interacción del flujo medio con el campo de presión acústica. Los resultados de interacción en las ondas de sonido que se propagan con el flujo medio que se desplaza a la velocidad del sonido (si la mezcla partícula/líquido no estaba fluyendo) más la velocidad de convección y, la inversa, las ondas de sonido que se desplazan contra el flujo medio que se propagan a la velocidad del sonido menos la velocidad de convección. Es decir

$$a_R = a_{mezcla} + u$$

- 40 donde  $a_R$  = velocidad de una onda acústica que se desplaza hacia la derecha respecto a un observador estacionario (es decir, la tubería 14),  $a_L$  = velocidad de una onda acústica que se desplaza hacia la izquierda aparente para un observador estacionario,  $a_{mezcla}$  = velocidad del sonido del fluido (si el fluido no estaba fluyendo) y  $u$  = velocidad de flujo media (suponiendo que fluye de izquierda a derecha en este caso). Combinando estas dos ecuaciones se produce una ecuación para la velocidad media,

$$u = \frac{a_R - a_L}{2}$$

Por lo tanto, midiendo la velocidad de propagación de las ondas acústicas en ambas direcciones respecto a la tubería estacionaria como se ha descrito anteriormente en este documento, la velocidad de flujo media puede calcularse multiplicando la velocidad de flujo media por el área de la sección transversal de la tubería 14.

La capacidad práctica de usar este método para determinar el flujo medio se predice sobre la capacidad de resolver la velocidad del sonido en ambas direcciones con una precisión suficiente para determinar el flujo volumétrico. Para mediciones en líquidos típicas, las velocidades de flujo típicamente son de 3,05 m/s (~10 pies por segundo) y las velocidades del sonido de ~1219 m/s (4000 pies/s). De esta manera, los números de Mach axiales son del orden de 10/4000 de 0,0025. Para una precisión de +/-10% a un caudal de 3,05 m/s (+/-1pie/s), la velocidad del sonido de las ondas que se propagan de manera ascendente y descendente sería necesario resolverlo a +/-0,5/4000 o 1 parte en 8.000.

Sin embargo, para flujos de una mezcla CP/aire, las velocidades de flujo axial son nominalmente de aproximadamente 21,3 m/s (70 pies/s), con velocidades del sonido sin flujo de 213 m/s ~(700 pies/s). Este resultado en números de Mach de ~ 0,1, es aproximadamente 2 órdenes de magnitud mayor que los flujos líquidos típicos. Para flujos de combustible pulverizados, al resolver el caudal a 10% de precisión 2,13 m/s (o +/- (7 pies/s), podría resolverse la velocidad del sonido a 1,07 m/s+/- (3,5 pies/s) o 3,5/700 o 1 parte en 200.

Para la medición de la velocidad del sonido, el caudalímetro 10 utiliza algoritmos de procesamiento similares a los empleados anteriormente en este documento. El contenido de frecuencia temporal y espacial del sonido que se propaga dentro de la tubería de proceso 14 está relacionado mediante una relación de dispersión.

$$\omega = \frac{k}{a_{mezcla}}$$

El número de onda es k, que está definido como  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\omega$  es la frecuencia temporal en rad/s y  $a_{mezcla}$  es la velocidad a la que el sonido se propaga dentro de la tubería del proceso. Para estos casos donde el sonido se propaga en ambas direcciones, la potencia acústica está localizada a lo largo de dos crestas acústicas, una para el sonido que se desplaza con el flujo, a una velocidad de  $a_{mezcla} + V_{mezcla}$ , y una para el sonido que se desplaza contra el flujo, a una velocidad de  $a_{mezcla} - V_{mezcla}$ .

La Figura 13 muestra una representación k- $\omega$  generada para un campo de sonido acústico de una mezcla carbón/aire que fluye a través de una tubería. Dos crestas acústicas son claramente evidentes. Cada una de las pendientes de las dos crestas acústicas representadas define, respectivamente, la velocidad del sonido que se desplaza con y contra el flujo medio.

El caudalímetro de sonar 10 de la Figura 1 está configurado y programado para medir y utilizar la velocidad del sonido que se propaga a través de una mezcla partícula/fluido 12 que fluye en una tubería 14 para determinar el caudal volumétrico. Con referencia a la Figura 14, un caudalímetro 70 que representa la presente invención incluye la capacidad de medir el caudal volumétrico de la mezcla midiendo las presiones no estacionarias generadas por la alteración vorticial 88 que se propaga en la mezcla. El caudalímetro 70 usa una o ambas de las siguientes técnicas para determinar la velocidad de convección de las alteraciones vorticiales dentro de la mezcla fluido/partícula 12 mediante:

- 1) Correlación cruzada de las variaciones de presión no estacionaria usando una serie de sensores de presión no estacionaria.
- 2) Caracterizar la cresta convectiva de las alteraciones vorticiales usando una serie de sensores de presión no estacionaria.

La gran mayoría de procesos de flujos de proceso industriales implican un flujo turbulento. Las fluctuaciones turbulentas dentro del flujo del proceso gobiernan muchas de las propiedades de flujo de interés práctico, incluyendo la pérdida de presión, transferencia de calor y mezcla. Para aplicaciones de ingeniería, a menudo es suficiente considerar solo las propiedades promediadas con el tiempo de los flujos turbulentos, para fines de diseño. Para tecnología de medición de flujo por sonar, entendiendo el perfil de velocidad promediado con el tiempo en flujo turbulento proporciona una media para interpretar la relación entre la velocidad a la que las estructuras coherentes convergen y el caudal promediado volumétricamente dentro de una tubería.

Para flujos turbulentos, la velocidad axial promediada con el tiempo varía con la posición radial, de cero en la pared a un máximo en la línea central de la tubería. El flujo cerca de la pared está caracterizado por gradientes de velocidad pronunciados y transiciones a un flujo de núcleo relativamente uniforme cerca del centro de la tubería. La Figura 15 muestra un esquema representativo de un perfil de velocidad y estructuras de flujo vorticial coherente 88 presentes en un flujo de tubería turbulento 12 totalmente desarrollado. Las estructuras vorticiales 88 están superpuestas con el perfil de velocidad promediado con el tiempo dentro de la tubería 14 y contienen fluctuaciones aleatorias temporales y espaciales con magnitudes típicamente menores del 10% de la velocidad de flujo media.

Desde una perspectiva de medición de flujo volumétrico, la velocidad de flujo promediada volumétricamente es de interés. La velocidad de flujo promediada volumétricamente, definida como  $V=Q/A$ , es útil, aunque es una propiedad definida arbitrariamente del flujo. Aquí, A es el área de la sección transversal de la tubería y Q es el caudal

volumétrico. De hecho, dado el perfil de velocidad dentro de la tubería, poco flujo se está moviendo realmente a esta velocidad.

Los flujos de tuberías turbulentas son flujos altamente complejos. Predecir los detalles de cualquier flujo turbulento es uno de los grandes problemas sin resolver de la naturaleza. Sin embargo, se sabe mucho respecto a las propiedades estadísticas del flujo. Por ejemplo, los flujos de tubería turbulentos contienen estructuras vorticiales coherentes, de auto-generación, a menudo denominadas "corrientes residuales turbulentas". La escala de longitud máxima de estas corrientes residuales se ajusta por el diámetro de la tubería. Estas estructuras permanecen coherentes para diversos diámetros de tubería aguas abajo, degradándose eventualmente en corrientes residuales cada vez más pequeñas hasta que la energía se disipa por los efectos viscosos.

Las investigaciones experimentales han establecido que las corrientes residuales generadas dentro de las capas del límite turbulento convergen a aproximadamente el 80% de la velocidad de flujo máxima. Para flujos de tubería, esto implica que las corrientes residuales convergerán aproximadamente a la velocidad de flujo promediada volumétricamente dentro de la tubería. La relación precisa entre la velocidad de convección de las corrientes residuales turbulentas y el caudal para cada clase de medidores puede calibrarse empíricamente como se describe más adelante.

El caudalímetro 70 de la Figura 14 determina la velocidad de convección de las alteraciones vorticiales dentro de la mezcla fluido/partícula por correlación cruzada de las variaciones de presión no estacionaria usando una serie de sensores de presión no estacionaria, análoga a la mostrada en la solicitud de Patente de Estados Unidos con N° de Serie 10/007.736, presentada el 8 de noviembre de 2001, titulada "Flow Rate Measurement Using Unsteady Pressures", que se incorpora en este documento por referencia.

Haciendo referencia a la Figura 14, el caudalímetro 70 incluye una sección detectora 72 a lo largo de una tubería 12 y una unidad de procesamiento de señales 74. La tubería (o conducto) 14 tiene dos regiones de medición 76, 78 localizadas a una distancia  $\Delta X$  separada a lo largo de la tubería 14. En la primera región de medición 76 hay dos sensores de presión no estacionaria 80, 82 (o dinámica o ca), localizados a una distancia separada  $X_1$ , capaz de medir la presión no estacionaria en la tubería 14, y en la segunda región de medición 78, hay otros dos sensores de presión no estacionarias 84, 86 localizados a una distancia separada  $X_2$  capaces de medir la presión no estacionaria en la tubería 14. Cada par de sensores de presión 80, 82 y 84, 86 actúa como filtros espaciales para retirar ciertas señales acústicas de las señales de presión no estacionaria, y las distancias  $X_1$ ,  $X_2$  están determinadas por las características de filtración deseadas para cada filtro espacial, como se analiza posteriormente en este documento.

El caudalímetro 70 de la presente invención mide velocidades asociadas con campos de flujo no estacionario y/o alteraciones de presión representadas por 88 asociadas con los mismos, relacionadas con corrientes residuales turbulentas (o campos de flujo vorticial), faltas de homogeneidad en el flujo (tal como burbujas, perlas y similares), o cualquier otra propiedad del flujo, fluido o presión que tenga tiempo de propiedades variables con el tiempo o estocásticas, que se manifiestan al menos en parte en forma de presiones no estacionarias. Los campos de flujo vorticial se generan dentro del fluido de la tubería 14 por una diversidad de fuentes no discretas, tales como maquinaria remota, bombas, válvulas, codos, así como el propio flujo de fluido. Es esta última fuente, el fluido que fluye dentro de la tubería, la que es una fuente genérica de campos de flujo vorticiales causados principalmente por las fuerzas de cizalla entre el fluido y la pared de la tubería, que asegura un nivel mínimo de alteraciones para cualquier sistema de tubería para el que la presente invención supone una ventaja única. Los campos de flujo vorticiales generados por flujo generalmente aumentan con la velocidad de flujo media, y no ocurren a ninguna frecuencia predeterminable. Como tal, no se requiere una fuente de generación de vórtice discreta externa dentro de la presente invención y, de esta manera, puede funcionar usando detección pasiva. Está dentro del alcance de la presente invención que el espaciado del sensor de presión puede ser conocido o arbitrario y que se requieren tan pocos como dos sensores si se conoce cierta información sobre las propiedades acústicas del sistema, como se describirá más completamente en este documento más adelante.

Los campos de flujo vorticiales 88, en general, están compuestos por alteraciones de presión que tienen una amplia variación en las escalas de longitud y que tienen una diversidad de escalas de longitud de coherencia, como se describe en la referencia "Sound and Sources of Sound", A. P. Dowling et al, Halsted Press, 1983, que se incorpora por referencia en la ampliación de comprensión de la invención. Ciertos de estos campos de flujo vorticiales 88 convergen en o cerca de, y/o están relacionados con la velocidad media de al menos uno de los elementos dentro de una mezcla que fluye en una tubería. Las alteraciones de presión vorticial 15 que contienen información respecto a la velocidad de convección tienen longitudes de escala temporal y espacial, así como longitudes de escala de coherencia que difieren de otras alteraciones en el flujo. La presente invención utiliza estas propiedades para seleccionar preferentemente alteraciones de una escala de longitud axial y escala de longitud de coherencia deseadas, como se describirá más completamente posteriormente en este documento. Para fines ilustrativos, los términos campo de flujo vorticial y campo de presión vorticial se usarán para describir el grupo descrito anteriormente de campos de presión no estacionaria que tienen escalas de longitud temporal y espacial y de coherencia descritas en este documento.

Las presiones  $P_1, P_2, P_3, P_4$  pueden medirse a través de los orificios en la tubería 14 con orificios a los sensores de presión externos o por otras técnicas analizadas posteriormente en este documento. Los sensores de presión 80, 82, 84, 86 proporcionan señales de presión basadas en tiempo  $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t)$  en las líneas 90 - 93, respectivamente, a la unidad de procesamiento de señales 74, que proporciona una señal de velocidad de convección  $U_c(t)$  en una línea 96 que está relacionada con el caudal promedio  $U_f(t)$  del fluido que fluye en la tubería 14.

También, algunas o todas las funciones dentro de la unidad de procesamiento de señales 74 pueden implementarse en software (usando un microprocesador u ordenador) y/o firmware, o pueden implementarse usando hardware analógico y/o digital, que tenga suficiente memoria, interfaces y capacidad para realizar las funciones descritas en este documento.

En particular, la unidad de procesamiento 74, la señal de presión  $P_1(t)$  en la línea 90 se proporciona a una entrada positiva de un sumatorio 100 y la señal de presión  $P_2(t)$  en la línea 91 se proporciona a una entrada negativa del sumatorio 100. La salida del sumatorio 100 se proporciona a la línea 104, indicativa de la diferencia entre las dos señales de presión  $P_1, P_2$  (por ejemplo  $P_1 - P_2 = P_m$ ).

Los sensores de presión 80, 82 junto con el sumatorio 100 crean un filtro espacial 76. La línea 104 se alimenta al filtro de paso de banda 108, que pasa a un paso de banda predeterminado de frecuencias y atenúa las frecuencias fuera del paso de banda. De acuerdo con la presente invención, el paso de banda del filtro 108 se ajusta para filtrar (o atenuar) la parte cc y la porción de alta frecuencia de las señales de entrada y hacer pasar las frecuencias entre ellas. Pueden usarse otros pasos de banda en otras realizaciones, si se desea. El filtro de paso de banda 108 proporciona una señal filtrada  $P_{asf1}$  en una línea 112 para la Correlación Cruzada Lógica 116 descrita en este documento posteriormente.

La señal de presión  $P_3(t)$  en la línea 92 se proporciona a una entrada positiva de un sumatorio 102 y la señal de presión  $P_4(t)$  en la línea 93 se proporciona a una entrada negativa del sumatorio 102. Los sensores de presión 83, 84 junto con el sumatorio 102 crean un filtro espacial 78. La salida del sumatorio 102 se proporciona en una línea 106 indicativa de la diferencia entre las dos señales de presión  $P_3, P_4$  (por ejemplo  $P_3 - P_4 = P_{as2}$ ). La línea 106 se alimenta a un filtro de paso de banda 110, similar al filtro de paso de banda 108 analizado anteriormente en este documento, que hace pasar frecuencias dentro del paso de banda y atenúa frecuencias fuera del paso de banda. El filtro 110 proporciona una señal filtrada  $P_{asf2}$  en una línea 114 a la Lógica de Correlación Cruzada 116. Los signos en los sumatorios 100, 102 pueden intercambiarse, si se desea, con la condición de que los signos de ambos sumatorios se intercambien juntos. Además, las señales de presión  $P_1, P_2, P_3, P_4$  pueden cambiarse de escala antes de la presentación a los sumatorios 100, 102.

La Lógica de Correlación Cruzada 116 calcula una correlación cruzada en el dominio de tiempo conocida entre las señales  $P_{asf1}$  y  $P_{asf2}$  en las líneas 112, 114, respectivamente, y proporciona una señal de salida en una línea 118 indicativa del retraso temporal  $\tau$  que tarda un campo de flujo vorticial 88 (o vórtice, estructura estocástica o vorticial, campo, alteración o perturbación dentro del flujo) en propagarse desde una región de detección 76 a otra región de detección 78. Dichas alteraciones de flujo vorticial, como se sabe, son condiciones dinámicas coherentes que pueden ocurrir en el flujo que sustancialmente decaen (en una cantidad predeterminada) con una distancia predeterminada (o longitud de coherencia) y convergen (o fluyen) a o cerca de la velocidad media del flujo de fluido. Como se ha descrito anteriormente, el campo de flujo vorticial 88 también tiene una alteración de presión estocástica o vorticial asociada con el mismo. En general, las alteraciones de flujo vorticial 88 están distribuidas por todo el flujo, particularmente en regiones de alta cizalla, tales como las capas de límite (por ejemplo, a lo largo de la pared interna de la tubería 14) y se muestran en ese documento como campos de flujo vorticial discretos 88. Debido a que los campos de flujo vorticial (y la alteración de presión asociada) convergen en o cerca de la velocidad de flujo media, el tiempo de propagación del retraso  $\tau$  está relacionado con la velocidad del flujo por la distancia  $\Delta X$  entre las regiones de medición 76, 78 como se analiza en este documento posteriormente.

Aunque las alteraciones de presión asociadas con los campos de flujo vorticial 88 ocurren de forma natural en la mayoría de condiciones de flujo, pueden usarse un surco circunferencial opcional (no mostrado) en el diámetro interno de la tubería 14 para ayudar a generar campos de flujo no estacionarios en forma de vórtices en el flujo. Sin embargo, para la presente invención no se requiere que el surco funcione, debido a la generación de vórtice que ocurre de forma natural a lo largo de la pared interna de la tubería, como se analiza posteriormente en este documento. En lugar de un solo surco circunferencial puede usarse una pluralidad de surcos circunferenciales axialmente espaciados. Las dimensiones y geometría de los surcos 70 pueden ajustarse en base a las condiciones de flujo esperadas y otros factores. Pueden usarse otras técnicas como generadores de vórtice, si se desea, incluyendo aquellos que pueden sobresalir dentro de diámetro interno de la tubería 14.

Haciendo referencia a la Figura 14, una señal de espaciado  $\Delta X$  en una línea 120 indicativa de la distancia  $\Delta X$  entre las regiones de detección 76, 78 está dividida por la señal de retraso temporal  $\tau$  en la línea 118 por un divisor 122 que proporciona una señal de salida en la línea 96 indicativa de la velocidad de convección  $U_c(t)$  del fluido que fluye en la tubería 14, que está relacionado con (o es proporcional a o aproximadamente igual a) la velocidad de flujo promedio (o media)  $U_f(t)$  del fluido, como se define a continuación:

$$U_c(t) = \Delta X / \tau \propto U_f(t)$$

Ec. 1

La velocidad de convección  $U_c(t)$  puede calibrarse entonces para determinar con más precisión la velocidad media  $U_f(t)$ , si se desea. El resultado de dicha calibración puede requerir multiplicar el valor de la velocidad de convección  $U_c(t)$  por una constante de calibrado (ganancia) y/o añadir una desviación de la calibración para obtener la velocidad de flujo media  $U_f(t)$  con la precisión deseada. Puede usarse otra calibración si se desea. Para algunas aplicaciones, puede que no se requiera dicha calibración para satisfacer la precisión deseada. Las velocidades  $U_f(t)$ ,  $U_c(t)$  pueden convertirse en caudal volumétrico multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal de la tubería.

Haciendo referencia a las Figuras 16 - 18, como se sabe, puede usarse la correlación cruzada para determinar el retraso temporal  $\tau$  entre dos señales  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  separadas por una distancia conocida  $\Delta X$ , que es indicativo de las cantidades 80 que convergen con el flujo (por ejemplo, perturbaciones de la densidad, perturbaciones de la concentración, perturbaciones de temperatura, alteraciones de la presión vorticial y otras cantidades). En la Figura 16, la señal  $y_2(t)$  transcurre detrás de la señal  $y_1(t)$  en 0,15 segundos. Si se toma una correlación transversal de dominio de tiempo entre las dos señales  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ , el resultado se muestra en la Figura 17 como una curva 124. El mayor pico 126 de la curva 126 muestra que el mejor ajuste para el lapso de tiempo  $\tau$  entre las dos señales  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  es a 0,15 segundos, lo que se ajusta con el retraso de tiempo de referencia mostrado en la Figura 17.

Con referencia a la Figura 14, como se ha analizado anteriormente en este documento, puesto que las alteraciones de presión asociadas con el campo de flujo vorticial 88 convergen (o fluyen) en o cerca de la velocidad media del fluido que fluye en la tubería 14, las alteraciones de presión vorticial observadas en la localización aguas abajo son sustancialmente una versión de lapso temporal de las alteraciones de presión vorticial observadas en la localización aguas arriba. Sin embargo, las perturbaciones o alteraciones de presión vorticial totales en una tubería pueden expresarse como comprendidas por alteraciones de presión vorticial ( $P_{vorticial}$ ), alteraciones de presión acústica ( $P_{acústica}$ ) y otros tipos de alteraciones de presión ( $P_{otra}$ ) como se muestra a continuación, expresado en términos de posición axial a lo largo de la tubería en cualquier punto en el tiempo:

$$P(x,t) = P_{vorticial}(x,t) + P_{acústica}(x,t) + P_{otra}(x,t) \quad \text{Ec. 2}$$

Como resultado, las alteraciones de presión no estacionaria  $P_{vorticial}$  pueden enmascarse por las alteraciones de presión acústica  $P_{acústica}$  y otros tipos de alteraciones de presión  $P_{otra}$ . En particular, la presencia de alteraciones de presión acústica que se propagan tanto aguas arriba como aguas abajo a la velocidad del sonido en el fluido (velocidad sónica), pueden impedir la medición directa de la velocidad desde la correlación transversal de las mediciones de presión vorticial directa.

La presente invención usa filtros temporal y espacial para precondicionar las señales de presión para filtrar eficazmente las alteraciones de presión acústica  $P_{acústica}$  y otras alteraciones de presión de longitud de onda larga (en comparación con el espaciado del detector) en la tubería 14 en las dos regiones detectoras 76, 78 y retener una porción sustancial de las alteraciones de presión vorticial  $P_{vorticial}$  asociadas con el campo de flujo vorticial 88 y cualquier otra alteración de presión de baja frecuencia de longitud de onda corta (en comparación con el espaciado del detector)  $P_{otras}$ . De acuerdo con la presente invención, si las alteraciones de presión de frecuencia baja  $P_{otra}$  son pequeñas, no afectarán sustancialmente a la medición de la precisión de  $P_{vorticial}$ .

Las señales denominadas  $P_{vorticial}$  de las dos regiones 76, 78 se correlacionan después de forma cruzada para determinar el retraso temporal  $\tau$  entre las dos localizaciones de detección 76, 78. Más específicamente, en la región de detección 72, la diferencia entre los dos sensores de presión 80, 82 crea un filtro espacial 76 que filtra eficazmente (o atenúa) las alteraciones acústicas para las que la longitud de onda  $\lambda$  de las ondas acústicas que se propagan a lo largo del fluido es larga (por ejemplo, de diez a uno) en comparación con el espaciado  $X_1$  entre los sensores. Otras proporciones de espaciado de longitud de onda a sensor pueden usarse para caracterizar la filtración, con la condición de que la proporción de espaciado de longitud de onda a sensor sea suficiente para satisfacer los criterios de Nyquist de alineación espacial.

De esta manera, si los sensores de presión  $P_1, P_2$  tienen un espaciado axial  $X_1$ , y suponiendo que el filtro espacial 76 atenuará las longitudes de onda acústicas mayores de aproximadamente 10 veces el espaciado del sensor  $X_1$ , la menor longitud de onda acústica  $\lambda_{min}$  que se atenúa será:

$$\lambda_{min} = 10 (X_1) \quad \text{Ec. 3}$$

Las alteraciones acústicas unidimensionales están gobernadas también por la siguiente relación inversa de longitud de onda-frecuencia:

$$\lambda = a / f \text{ o } f = a / \lambda \quad \text{Ec. 4}$$

donde a es la velocidad del sonido del fluido, f es la frecuencia de la alteración acústica y  $\lambda$  es la longitud de onda de la alteración acústica.

5 Usando la Ec. 4, dicho filtro espacial filtraría las frecuencias por debajo de aproximadamente:

$$f_{\max} = a / \lambda_{\min} \quad \text{Ec. 5}$$

10 El análisis anterior sobre el filtro espacial 76 se aplica también al segundo filtro espacial 78 que comprende el otro par de señales de presión  $P_3, P_4$ , separadas axialmente a una distancia  $X_2$ , que proporciona la señal de presión vorticial diferenciada  $P_{as2}$ .

15 La segunda técnica para determinar la velocidad de convección de las alteraciones vorticiales dentro de la mezcla fluido/partícula es caracterizando la cresta convectiva de las alteraciones vorticiales usando una serie de sensores de presión no estacionaria, como se describirá.

20 La metodología de medición de flujo por sonar usa la velocidad de convección de la estructura coherente con flujos de tubería turbulenta para determinar el caudal volumétrico. La velocidad de convección de estas corrientes residuales 88 se determina aplicando técnicas de procesamiento de serie sonar para determinar la velocidad a la que las corrientes residuales convergen más allá de una serie axial de mediciones de presión no estacionaria distribuidas a lo largo de la tubería 14.

25 Los algoritmos basados en sonar determinan la velocidad de las corrientes residuales caracterizando tanto las características de frecuencia temporal como espacial del campo de flujo. Para un conjunto de corrientes residuales coherentes que convergen más allá de serie fija de sensores, el contenido de frecuencia temporal y espacial de las fluctuaciones de presión están relacionados mediante la siguiente relación:

$$\omega = \frac{k}{U_{\text{convección}}}$$

30 Aquí k es el número de onda, definido como  $k=2\pi/\lambda$  y tiene unidades de 1/longitud,  $\omega$  es la frecuencia temporal en rad/s y  $U_{\text{convección}}$  es la velocidad de convección. De esta manera, cuanto más corta sea la longitud de onda (mayor k) mayor será la frecuencia temporal.

35 En el procesamiento de serie sonar, el contenido de frecuencia espacial/temporal de los campos de sonido estacionario con el tiempo a menudo se presenta usando "representaciones k- $\omega$ ". Las representaciones k- $\omega$  son esencialmente espectros de potencia tridimensionales en los que la potencia de un campo de sonido se descompone en elementos binarios correspondientes a números de onda espaciales específicos y frecuencias temporales. En una representación k- $\omega$ , la potencia asociada con un campo de presión que converge con el flujo se distribuye en regiones que satisfacen la relación de dispersión desarrollada anteriormente. Esta región se denomina "la cresta convectiva" (Beranek, 1992) y la pendiente de esta cresta en una representación k-w indica la velocidad convectiva del campo de presión. Esto sugiere que la velocidad convectiva de las corrientes residuales turbulentas y, de esta manera, el caudal de una tubería, puede determinarse construyendo una representación k- $\omega$  desde la salida de una serie de sensores en fase, e identificando la pendiente de la cresta convectiva.

45 La Figura 19 muestra un ejemplo de la representación k- $\omega$  generada a partir de una serie de sensores de presión en fase. Los contornos de potencia muestran una cresta convectiva bien definida. Se usó un método de optimización paramétrica para determinar la "mejor" representación lineal de la pendiente de la cresta convectiva 100. Para este caso, se determinó una pendiente de 4,33 m/s (14,2 pies/s). El resultado intermedio del procedimiento de optimización se presenta en la intersección, mostrando que el valor optimizado es un óptimo único y bien definido.

50 La representación k- $\omega$  mostrada en la Figura 19 ilustra el principio fundamental que hay detrás de la medición de flujo basada en sonar, en concreto la serie axial de sensores de presión puede usarse junto con técnicas de procesamiento sonar para determinar la velocidad a la que las corrientes residuales turbulentas que ocurren de forma natural convergen dentro de una tubería.

55 Los sensores de presión 15-18 descritos en este documento pueden ser cualquier tipo de sensor de presión, capaz de medir las presiones no estacionarias (o ca o dinámica) dentro de una tubería 14, tal como piezoeléctrico, óptico, capacitivo, resistivo (por ejemplo, puente de Wheatstone), acelerómetros (o geófonos), dispositivos para medir la velocidad, dispositivos para medir el desplazamiento, etc.). si se usan sensores de presión ópticos, los sensores 60 15-18 pueden ser sensores de presión basados en la red de Bragg, tales como los descritos en la Solicitud de Patente de Estados Unidos con N° de Serie 08/925.598, titulada "High Sensitivity Fiber Optic Pressure Sensor For Use In

Harsh Environments", presentada el 8 de septiembre de 1997, ahora Patente de Estados Unidos 6.016.702. Como alternativa, los sensores 14 pueden ser galgas de tensión eléctricas u ópticas, fijadas a o embebidas en la pared exterior o interior de la tubería, que miden la tensión de la pared de la tubería, incluyendo micrófonos, hidrófonos o cualquier otro sensor capaz de medir las presiones no estacionarias dentro de la tubería 14. En una realización de la presente invención, que utiliza fibras ópticas como los sensores de presión 14, éstos pueden estar conectados individualmente o pueden multiplicarse a lo largo de una o más fibras ópticas usando multiplexación de división de longitud de onda (WDM), multiplexación de división de tiempo (TDM) o cualquier otra técnica de multiplexación óptica.

Para cualquiera de las realizaciones descritas en este documento, los sensores de presión, incluyendo galgas de tensión eléctrica, fibras ópticas y/o redes, entre otras, como se describe en este documento, pueden fijarse a la tubería mediante adhesivo, pegamento, epoxi, cinta u otro medio de fijación adecuado para asegurar el contacto adecuado entre el sensor y la tubería 14. Como alternativa, los sensores pueden retirarse o fijarse permanentemente por técnicas mecánicas conocidas, tales como sujeción mecánica, carga por resorte, sujeción, disposición en concha de almeja, flejado u otros equivalentes. Como alternativa, las galgas de tensión, incluyendo fibras ópticas y/o redes, pueden estar embebidas en una tubería compuesta. Si se desea, para ciertas aplicaciones, las redes pueden separarse de (o aislarse por tensión o acústicamente) de la tubería 14, si se desea.

También está dentro del alcance de la presente invención que puede usarse cualquier técnica de detección de tensión para medir las variaciones en la tensión de la tubería, tal como galgas de tensión piezoeléctricas, electrónicas o eléctricas, altamente sensibles, fijadas a o embebidas en la tubería 14.

En ciertas realizaciones de la presente invención, puede usarse un transductor de presión piezoeléctrico como uno o más sensores de presión 15-18, y pueden medirse las variaciones de presión no estacionaria (o dinámica o ca) dentro de la tubería 14 midiendo los niveles de presión dentro de la tubería. En una realización de la presente invención, los sensores 14 comprenden sensores de presión fabricados por PCB Piezotronics. En un sensor de presión hay sensores tipo modo con circuito integrado de tensión piezoeléctrica, que se caracterizan por amplificadores microelectrónicos internos, y convierten la alta carga de impedancia en salida de tensión de baja impedancia. Específicamente, se usa un Modelo 106B fabricado por PCB Piezotronics que tiene una alta sensibilidad, un sensor de presión de cuarzo piezoeléctrico con circuito integrado compensado en aceleración adecuado para medir los fenómenos acústicos de baja presión en sistemas hidráulicos y neumáticos. Tiene la capacidad única de medir pequeños cambios de presión de menos de 6,89 Pa (0,001 psi) en condiciones altamente estáticas. El 106B tiene 43,51  $\mu\text{V}/\text{Pa}$  (300 mV/psi) de sensibilidad y una resolución de 91 dB 0,689 Pa (0,0001 psi).

Los sensores de presión incorporan un amplificador microelectrónico MOSFET incorporado para convertir la salida de alta carga de impedancia en una señal de tensión de baja impedancia. El sensor está activado desde una fuente de corriente constante y puede funcionar sobre un largo cable o cinta coaxial, sin degradación de la señal. La señal de tensión de baja impedancia no está afectada por el ruido del cable triboeléctrico o contaminantes degradantes de la resistencia de aislamiento. La energía para hacer funcionar los sensores piezoeléctricos del circuito integrado generalmente toma la forma de un suministro de corriente constante de bajo coste de 24 a 27 VDC, de 2 a 20 mA. Un sistema de adquisición de datos de la presente invención puede incorporar una potencia de corriente constante para dirigir directamente los sensores piezoeléctricos de circuito integrado.

La mayoría de sensores de presión piezoeléctricos están contruidos con cristales de cuarzo en modo compresión, precargados en una carcasa rígida, o cristales de turmalina libres. Estos diseños dan a los sensores tiempos de respuesta de microsegundos y frecuencias resonantes de cientos de kHz, con un sobre-exceso o sobre-oscilación mínimos. Los pequeños diámetros de diafragma aseguran una resolución espacial de ondas de choque estrecha.

Las características de salida de los sistemas de presión piezoeléctricos son las de un sistema AC acoplado, donde las señales repetitivas se degradan hasta que hay un área igual por encima y por debajo de la línea base original. Como los niveles de magnitud del evento controlado fluctúan, la salida sigue estabilizada alrededor de la línea base, permaneciendo iguales las áreas positiva y negativa de la curva.

Adicionalmente, la presente invención contempla que cada uno de los sensores de presión 15-18 de los caudalímetros 10,70 puede incluir en un sensor piezoeléctrico a 104-107 que proporciona un material piezoeléctrico 110 para medir las presiones no estacionarias de la mezcla de fluido/partícula 12 como se muestra en la Figura 20. El material piezoeléctrico, tal como el polímero, fluoropolímero polarizado, fluoruro de polivinilideno (PVDF), mide la tensión inducida con la tubería de proceso 14 debido a las variaciones de presión no estacionaria dentro de la mezcla de proceso 12. La tensión dentro de la tubería se transduce a una tensión o corriente de salida mediante los sensores piezoeléctricos 104-107 fijados.

Como se muestra mejor en la Figura 21, el material PVDF 110 está adherido a la superficie externa de una tira de acero 112 que se extiende alrededor y sujeta la superficie externa de la tubería 14. Los elementos detectores piezoeléctricos típicamente son conformacionales para permitir una medición circunferencial completa o casi completa de la tensión inducida. Los sensores pueden formarse a partir de películas de PVDF, películas de copolímero o sensores PZT flexibles, similares a los descritos en "Piezo Film Sensors technical Manual"

proporcionado por Measurement Specialties, Inc., que se incorpora en este documento por referencia. Las ventajas de esta técnica son las siguientes:

1. Mediciones de caudal no intrusivas

2. Bajo coste

3. La técnica de medición no requiere una fuente de excitación. El ruido de flujo ambiente se usa como una fuente.

4. Los sensores piezoeléctricos flexibles pueden montarse en una diversidad de configuraciones para potenciar los esquemas de detección de señales. Estas configuraciones incluyen a) sensores co-localizados, b) sensores segmentados con configuraciones de polaridad opuesta, c) sensores amplios para potenciar la detección de señal acústica y minimizar la detección de ruido vorticial, d) geometrías de sensor a medida para minimizar la sensibilidad de los modos de tubería, e) diferenciación de sensores para eliminar el ruido acústico a partir de señales vorticiales.

5. Mayores Temperaturas (140 °C) (copolímeros)

Aunque la presente invención es capaz de medir las partículas sólidas suspendidas en un fluido, se apreciará que pueden medirse otras mezclas multifásicas o flujos usando una serie de sensores, tal como un flujo de vapor. Se reconoce adicionalmente que los efectos de la dispersión de partículas sólidas grandes en un fluido serían similares a grandes gotas de un líquido dispersadas en un gas o aire y, de esta manera, deberían abordarse consideraciones similares cuando se mide la calidad del vapor y el tamaño de la gota.

Debe entenderse que cualquiera de los elementos, características, alternativas o modificaciones descritas respecto a una realización particular en este documento pueden aplicarse, usarse e incorporarse con cualquier otra realización descrita en este documento.

Aunque la invención se ha descrito e ilustrado con respecto a realizaciones ejemplares de la misma, la anterior y otras diversas adiciones y omisiones pueden hacerse a la misma sin alejarse del espíritu y alcance de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato (10) para medir al menos un parámetro de una mezcla partícula/fluido (12) en una tubería (14) que comprende:

una serie espacial de al menos dos sensores de presión (15, 16, 17, 18), dispuestos en localizaciones axiales diferentes a lo largo de la tubería (14), y cada uno de los cuales mide una presión no estacionaria dentro de la tubería (14) en una localización axial correspondiente ( $X_1, X_2, X_3, X_N$ ), proporcionando cada uno de dichos sensores una señal de presión indicativa de la presión no estacionaria dentro de la tubería (14) en dicha localización axial ( $X_1, X_2, X_3, X_N$ ) de uno correspondiente de dichos sensores (15, 16, 17, 18); y un procesador de señales (30), sensible a dichas señales de presión, **caracterizado por que** el procesador de señales (30) está adaptado para determinar la velocidad de propagación del sonido en la mezcla (12) como una función de la frecuencia para caracterizar las propiedades de dispersión de la mezcla (12) y comparar las propiedades de dispersión de la mezcla (12) con un modelo de dispersión de la mezcla (12) para proporcionar una señal indicativa de al menos un parámetro de la mezcla (12) en la tubería (14).

2. El aparato (10) de la reivindicación 1, en el que los sensores de presión (15, 16, 17, 18) se seleccionan entre el grupo que comprende dispositivos piezoeléctricos, dispositivos ópticos, dispositivos capacitivos, dispositivos resistivos, dispositivos para medir la velocidad, dispositivo para medir el desplazamiento y acelerómetros o geófonos.

3. El aparato (10) de la reivindicación 1, en el que los sensores de presión (15, 16, 17, 18) incluyen sensores basados en tensión o galgas.

4. El aparato (10) de la reivindicación 1 cuyo modelo de dispersión se deduce analíticamente.

5. El aparato (10) de la reivindicación 1, en el que el modelo de dispersión deducido analíticamente es:

$$a_{mezcla}(\omega) = a_f \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\varphi_p \rho_p}{\rho_f \left(1 + \omega^2 \frac{\rho_p^2 v_p^2}{K^2}\right)}}$$

en la que

- $\alpha_{mezcla}$  es la velocidad del sonido que se propaga a través de la mezcla;
- $\alpha_f$  es la velocidad del sonido que se propaga a través del fluido;
- $\rho_f$  es la densidad del fluido;
- $\rho_p$  es la densidad de la partícula;
- $\omega$  es la frecuencia;
- $v_p$  es el volumen de partícula;
- K es una constante de proporcionalidad;
- $\varphi_p$  es la fracción en fase volumétrica.

6. El aparato (10) de la reivindicación 1 adaptado para medir una mezcla sólido/fluido (12) que incluye una de una mezcla sólido/líquido (12) y una mezcla sólido/aire (12).

7. El aparato (10) de la reivindicación 1 adaptado para medir, al menos, un parámetro de la mezcla (12) que incluye al menos uno de proporción sólido/líquido y un tamaño promedio de las partículas de la mezcla (12).

8. El aparato (10) de la reivindicación 1 en el que el procesador de señales (30) está adaptado adicionalmente para caracterizar las propiedades de dispersión de la mezcla (12) en respuesta a la viscosidad del fluido, densidad del fluido, densidad de las partículas, volumen de partículas estimado y fracción en fase volumétrica estimada de la mezcla (12).

9. El aparato (10) de la reivindicación 1, en el que la característica dispersiva de la mezcla (12) proporciona una medición del tamaño de partícula medio y la proporción sólido/fluido de la mezcla (12).

10. El aparato (10) de la reivindicación 1 que incluye la capacidad de medir el caudal volumétrico de la mezcla (12) comparando la diferencia de velocidad de las ondas de sonido unidimensionales que se propagan con y contra el medio de flujo.

11. El aparato (10) de la reivindicación 1 en el que cada sensor está adaptado para medir una presión acústica y proporciona una señal indicativa de un ruido acústico dentro de la tubería (14).

12. El aparato (10) de la reivindicación 1 en el que dicho procesador de señales (30) está adaptado para proporcionar una señal basada en frecuencia para cada una de dichas señales de presión.

13. El aparato (10) de la reivindicación 1 que comprende al menos tres de dichos sensores (15, 16, 17).

14. El aparato (10) de la reivindicación 1 en el que la serie de sensores de presión (15, 16, 17, 18) están separados suficientemente de manera que toda la longitud de la serie es al menos una fracción significativa de la longitud de onda medida de las ondas acústicas que se están midiendo.

15. El aparato (10) de la reivindicación 1 en el que el procesador de señales (30) está adaptado para definir una cresta acústica en el plano k- $\omega$  y determina la pendiente de al menos una porción de una cresta acústica para determinar la velocidad de propagación del sonido a través de la mezcla (12).

16. Un método para medir al menos un parámetro de una mezcla sólido/fluido (12) en una tubería (14) comprendiendo dicho método:

medir presiones no estacionarias dentro de la tubería (14) en al menos dos localizaciones de medición axial predeterminadas ( $X_1, X_2, X_3, X_N$ ), a lo largo de la tubería (14) para proporcionar una señal de presión indicativa de la presión no estacionaria dentro de la tubería (14) en cada una de al menos dos localizaciones de medición axial predeterminadas ( $X_1, X_2, X_3, X_N$ );

**caracterizado por que** dicho método comprende adicionalmente calcular el al menos un parámetro de la mezcla sólido/fluido (12) en la tubería (14) usando la presión no estacionaria medida en las localizaciones de medición axial ( $X_1, X_2, X_3, X_N$ ) determinando la velocidad de propagación del sonido a través de la mezcla (12) como una función de la frecuencia para caracterizar las propiedades de dispersión de la mezcla (12) y comparar las propiedades de dispersión de la mezcla (12) con un modelo de dispersión de la mezcla (12).

17. El método de la reivindicación 16, en el que los sensores de presión (15, 16, 17, 18) se seleccionan entre el grupo que comprende dispositivos piezoeléctricos, dispositivos ópticos, dispositivos capacitivos, dispositivos resistivos, dispositivos de medición de velocidad, dispositivos de medición del desplazamiento y acelerómetros o geófonos.

18. El método de la reivindicación 16 que usa un modelo de dispersión que se deduce analíticamente.

19. El método de la reivindicación 16, que usa un modelo de dispersión deducido analíticamente que es:

$$a_{mezcla}(\omega) = a_f \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\varphi_p \rho_p}{\rho_f \left( 1 + \omega^2 \frac{\rho_p^2 v_p^2}{K^2} \right)}}$$

en la que

$\alpha_{mezcla}$  es la velocidad de propagación del sonido a través de la mezcla;

$\alpha_f$  es la velocidad de propagación del sonido a través del fluido;

$\rho_f$  es la densidad del fluido;

$\rho_p$  es la densidad de la partícula;

$\omega$  es la frecuencia;

$v_p$  es el volumen de partícula;

K es una constante de proporcionalidad;

$\varphi_p$  es la fracción en fase volumétrica.

20. El método de la reivindicación 16 para medir una mezcla sólido/fluido (12) que incluye una de una mezcla sólido/líquido (12) y una mezcla sólido/aire (12).

21. El método de la reivindicación 16 para medir al menos un parámetro de la mezcla (12) que incluye al menos una proporción sólido/líquido y un tamaño de sólido promedio de la mezcla (12).

22. El método de la reivindicación 16, en el que la correlación cruzada se usa para determinar el retraso temporal entre dos señales separadas por una distancia conocida que son indicativas de cantidades (80) que convergen con el flujo incluyendo, al menos, una de perturbaciones de densidad, perturbaciones de concentración, perturbaciones

de temperatura, alteraciones de la presión vorticial.

23. El método de la reivindicación 16, en el que la característica de dispersión de la mezcla (12) proporciona una medición del tamaño de partícula medio y la proporción sólido/fluido de la mezcla (12).

5 24. El método de la reivindicación 16 que incluye la capacidad de medir el caudal volumétrico de la mezcla (12) por comparación de la diferencia de velocidad de las ondas de sonido unidimensionales que se propagan con y contra el medio de flujo.

10 25. El método de la reivindicación 16 en el que cada sensor mide una presión acústica y proporciona una señal indicativa de un ruido acústico dentro de la tubería (14).

26. El método de la reivindicación 16 en el que dicho procesador de señales (30) proporciona una señal basada en frecuencia para cada una de dichas señales de presión.

15 27. El método de la reivindicación 16 que usa, al menos, tres de dichos sensores.

28. El método de la reivindicación 16 que usa una serie de sensores de presión (15, 16, 17, 18) que están espaciados suficientemente de manera que toda la longitud de la serie es al menos una fracción significativa de la longitud de onda medida de las ondas acústicas que se están midiendo.

29. El método de la reivindicación 16, en el que el método incluye determinar la mejor línea que representa la pendiente de una cresta acústica en el plano  $k-\omega$  y determinar la pendiente de dicha porción de la cresta acústica para determinara la velocidad de propagación del sonido a través de la mezcla (12).

25 30. El método de la reivindicación 16, en el que los sensores de presión (15, 16, 17, 18) incluyen sensores basados en tensión o galgas.

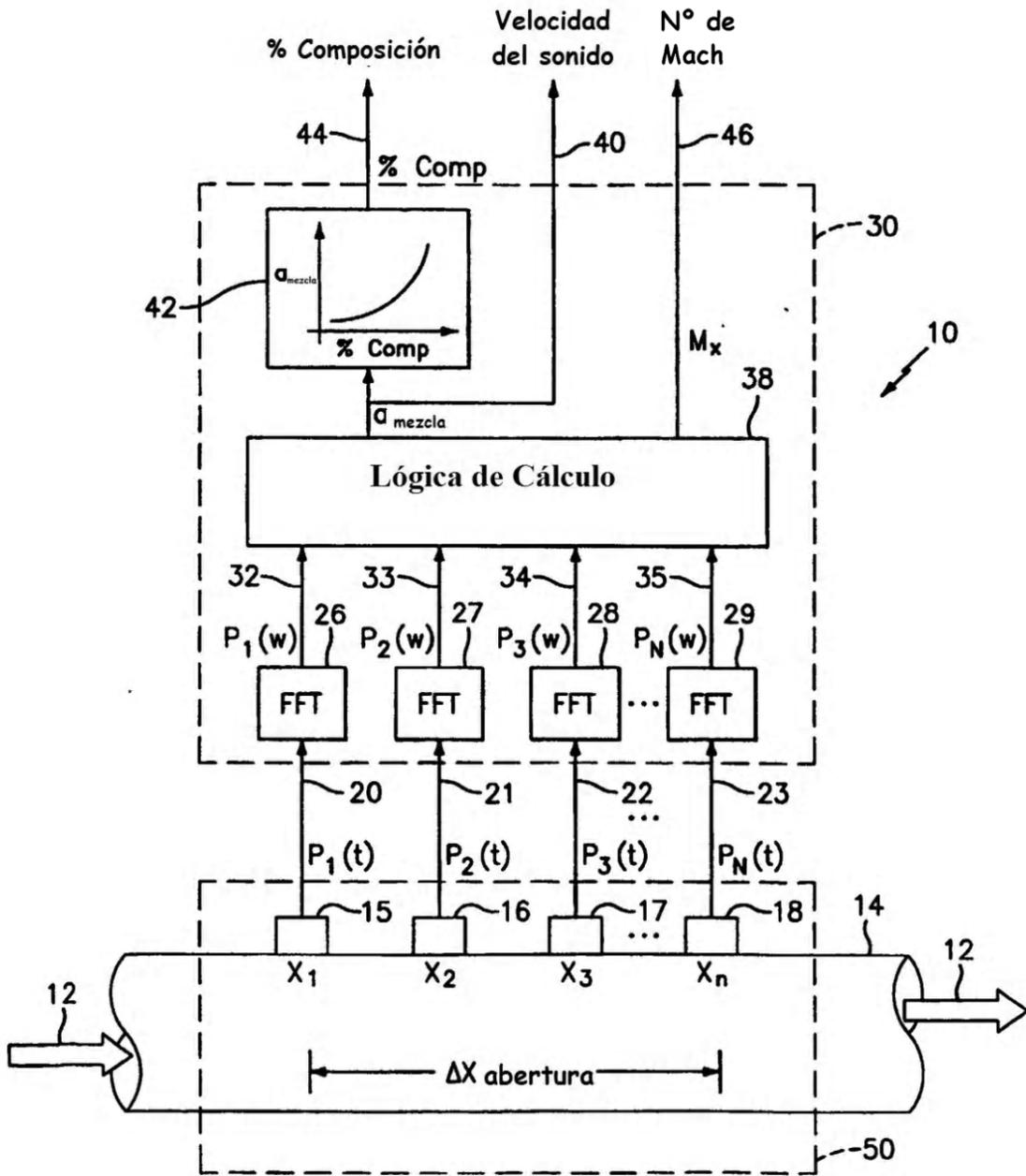


FIG. 1

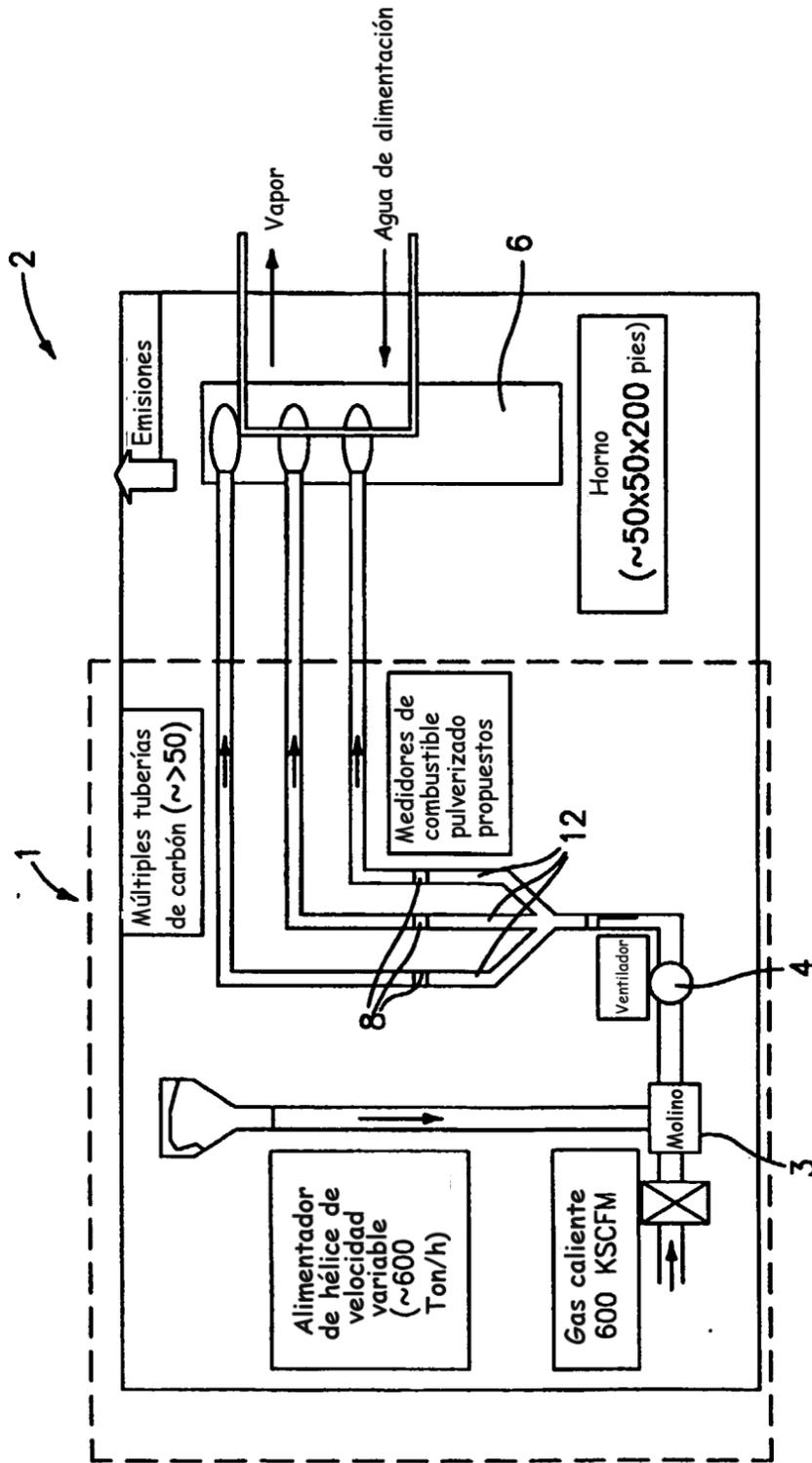
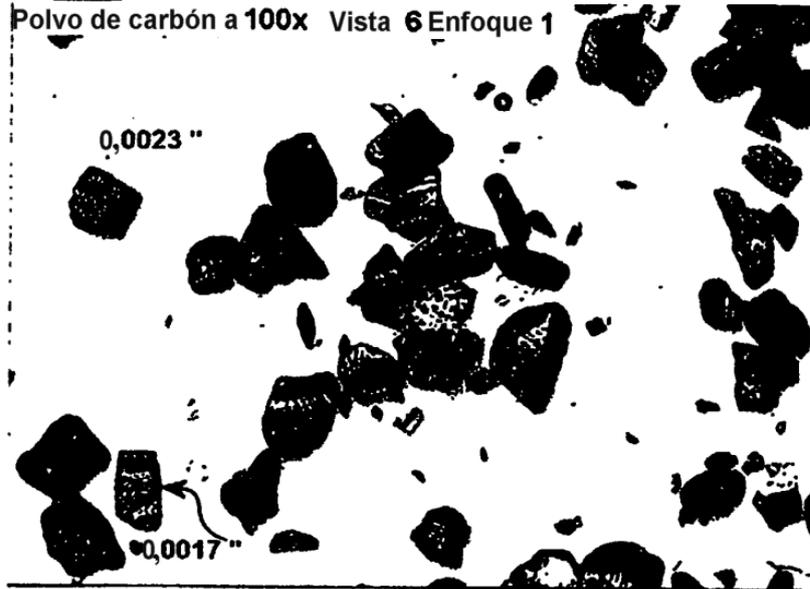
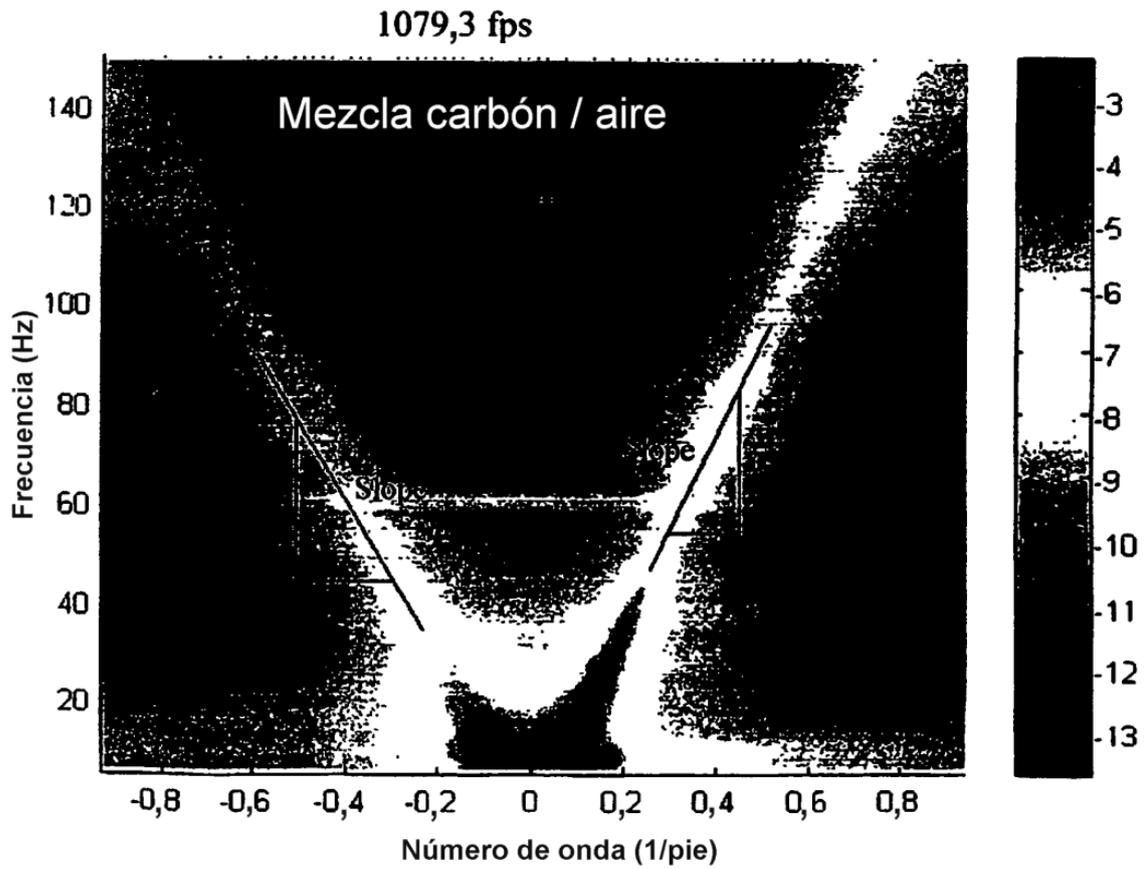


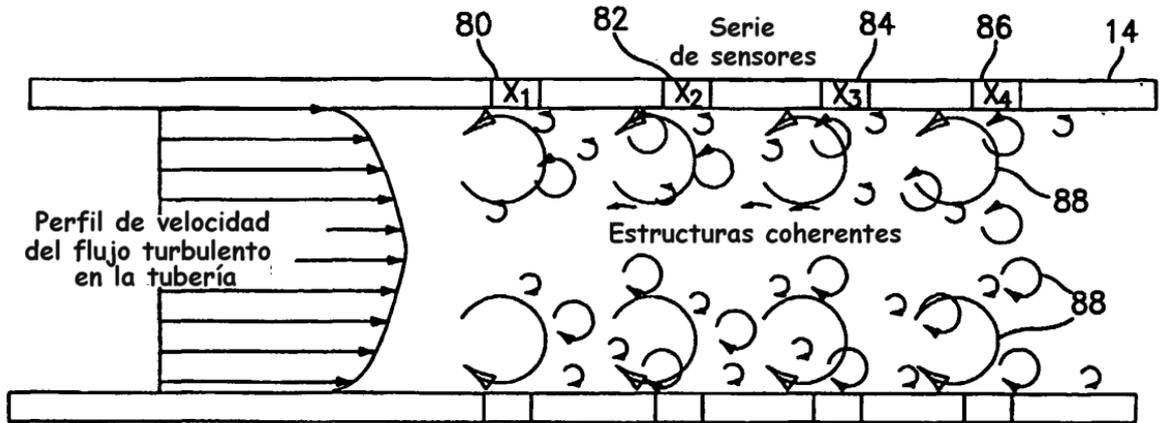
FIG. 2



*FIG. 3*

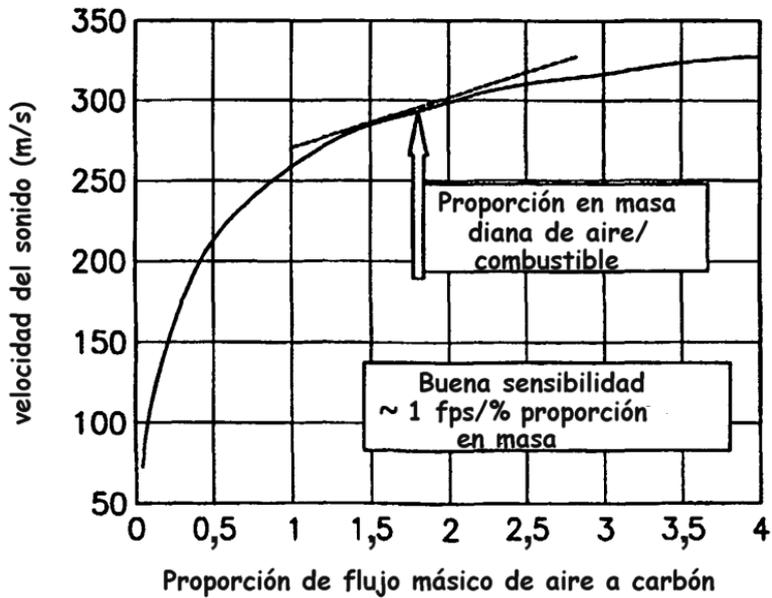


*FIG. 13*



**FIG. 15**

SOS de mezclas de carbón pulverizado/Aire - Región de interés



**FIG. 4**

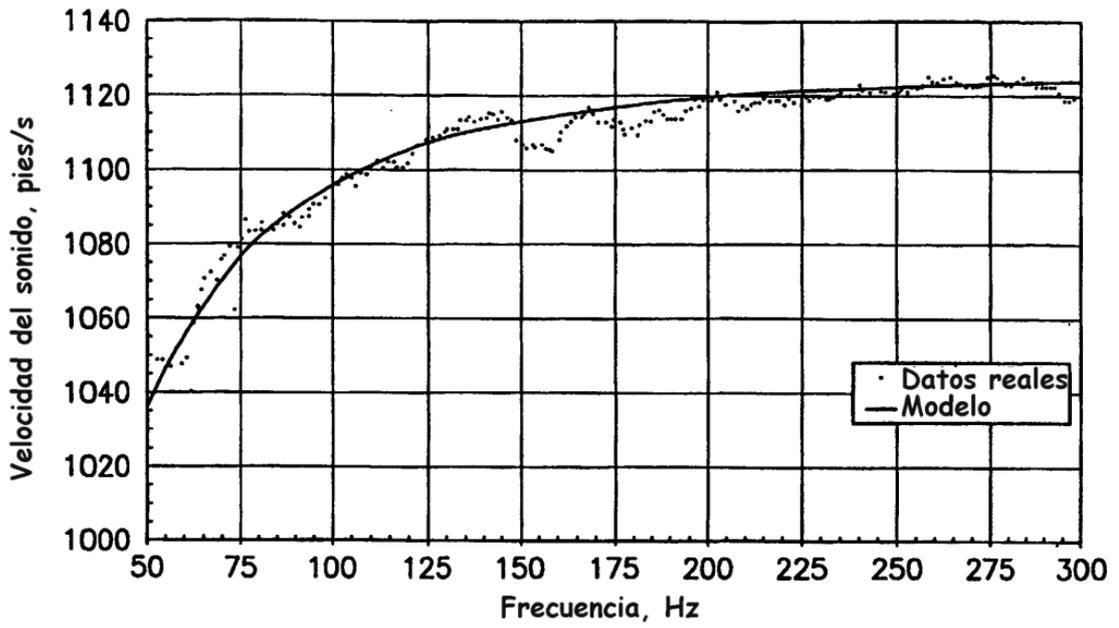


FIG. 5

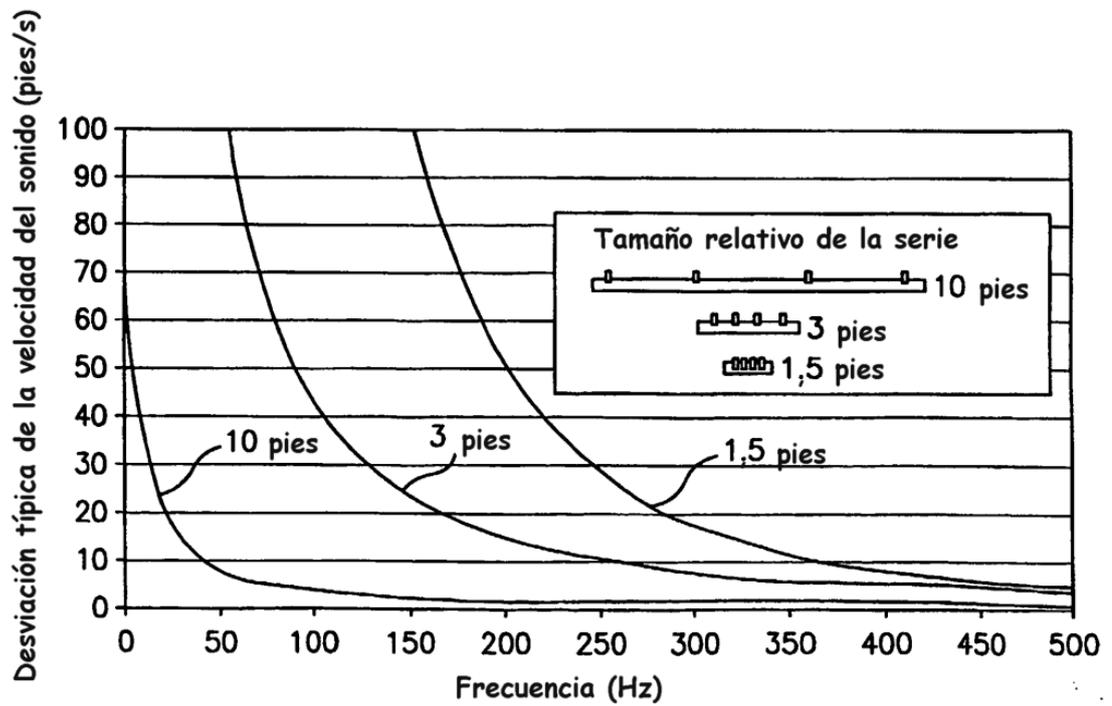


FIG. 6

Modelo acústico para partículas en aire

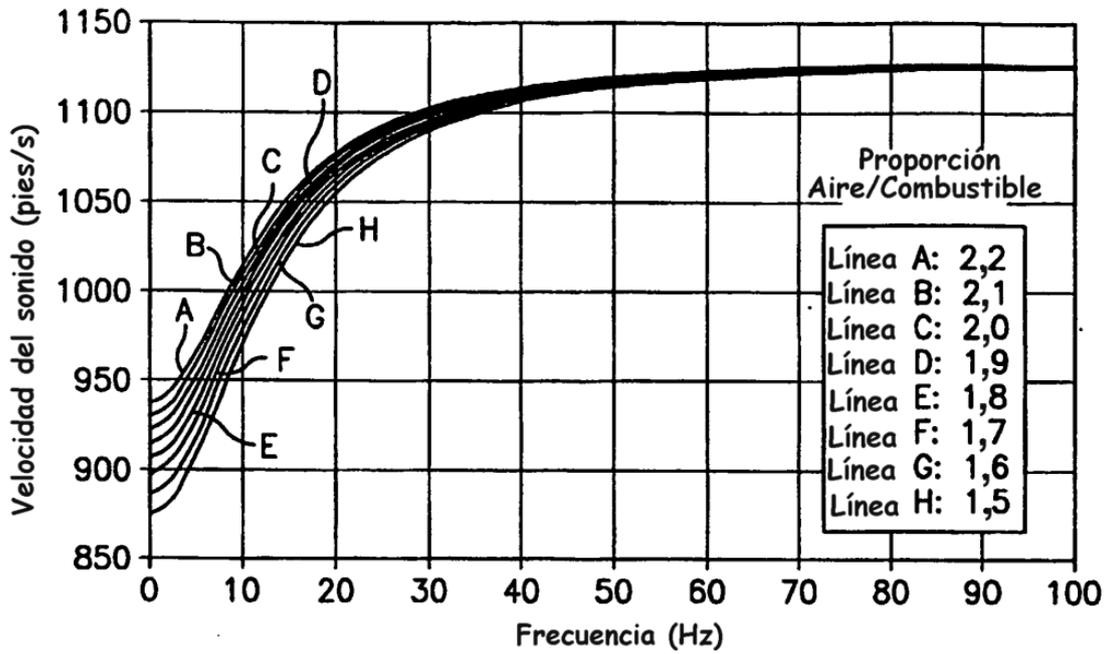


FIG. 7

Modelo acústico para partículas en aire

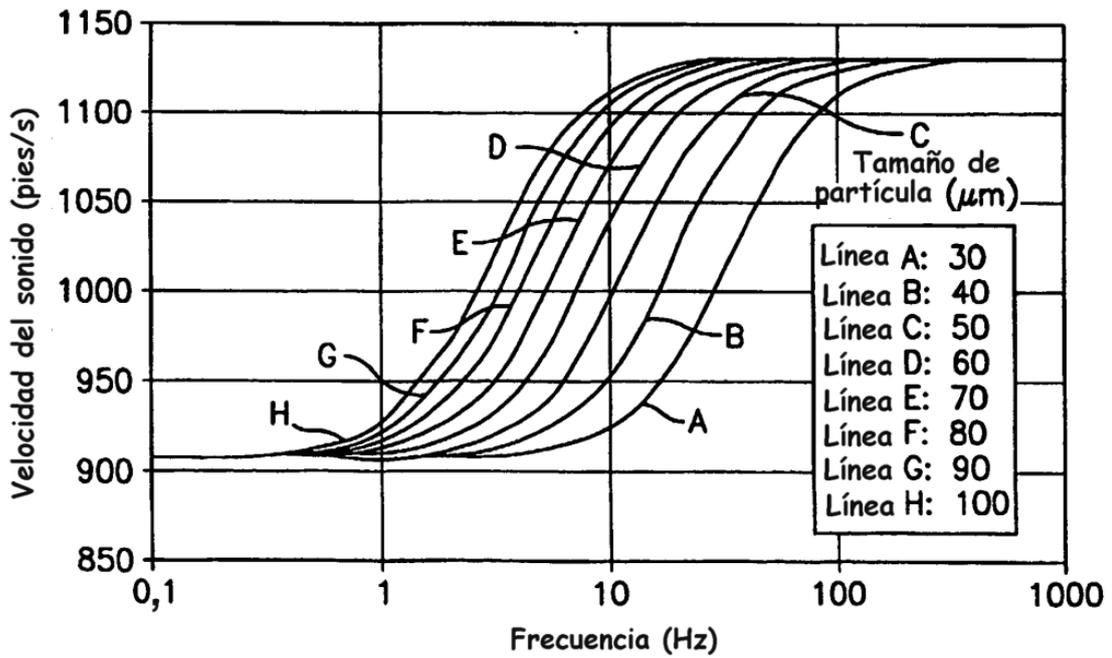


FIG. 8

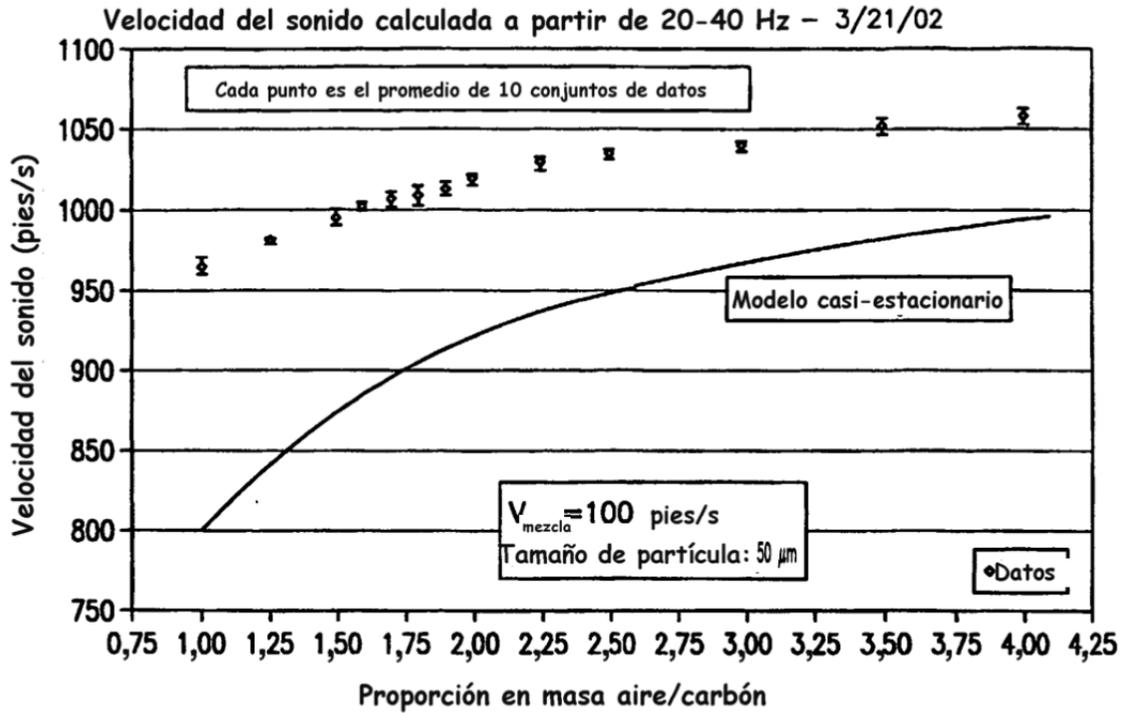


FIG. 9

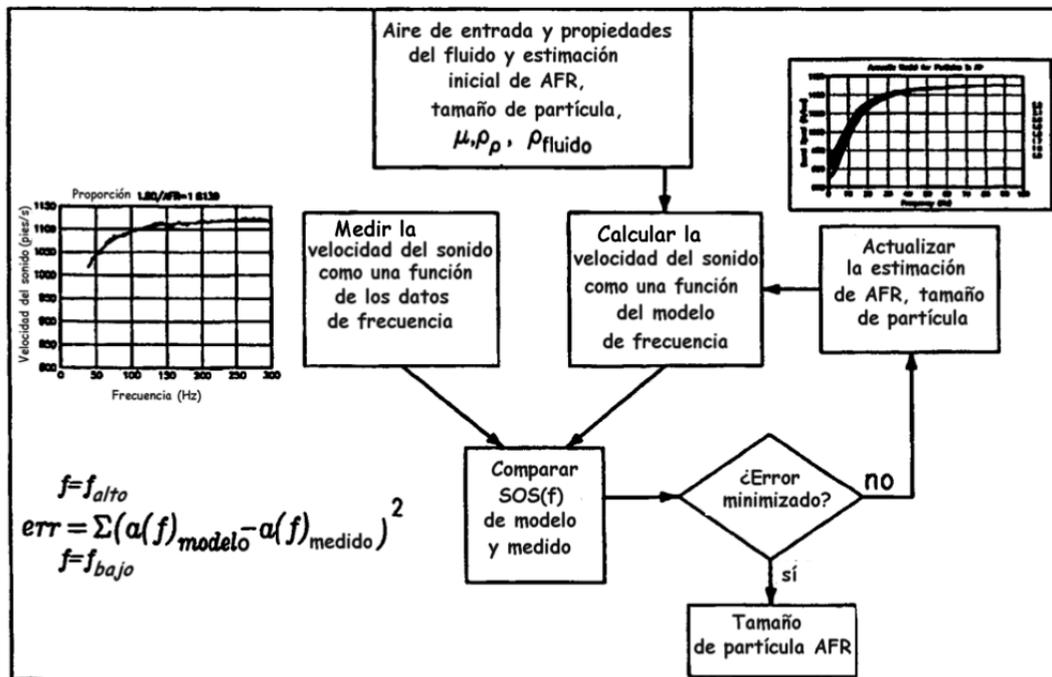
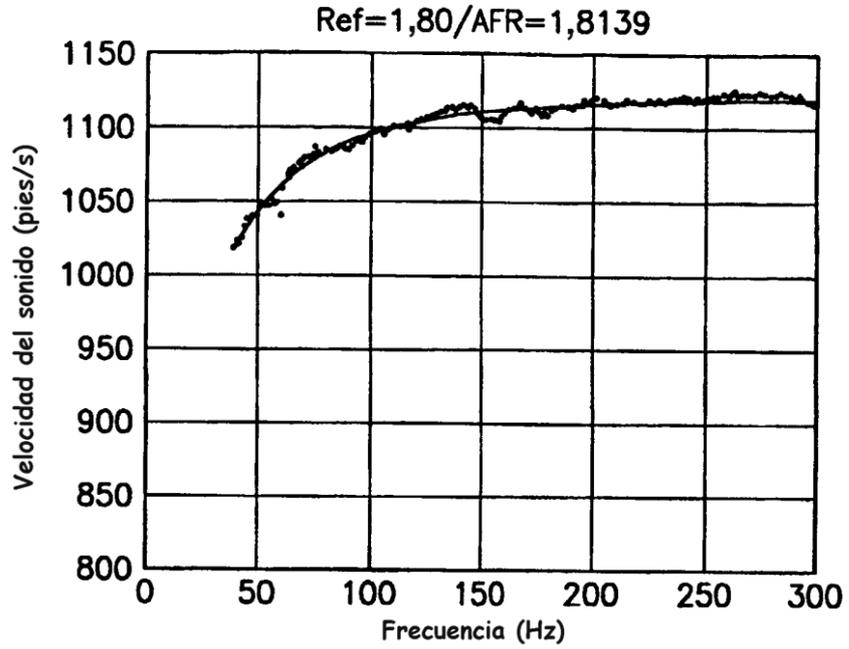
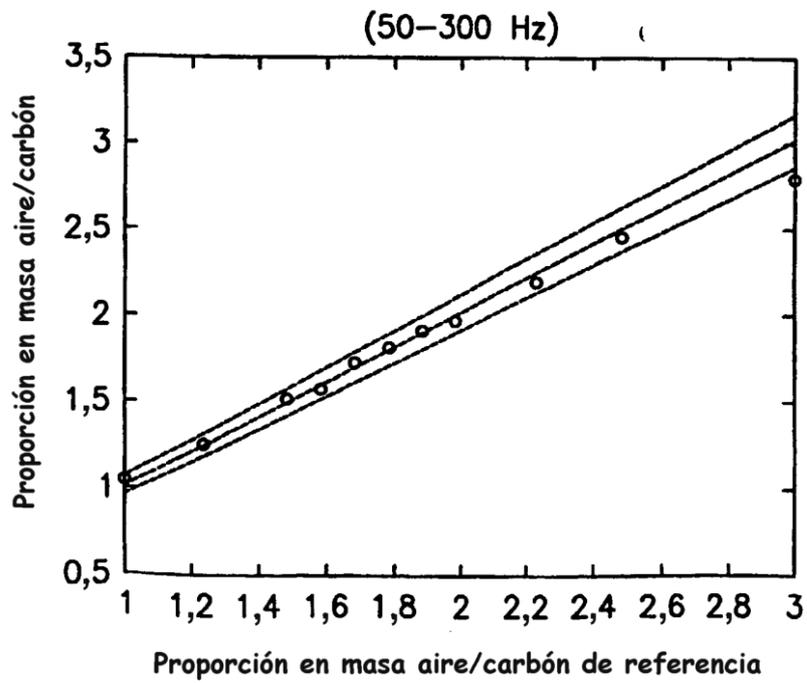


FIG. 10



**FIG. 11**



**FIG. 12**

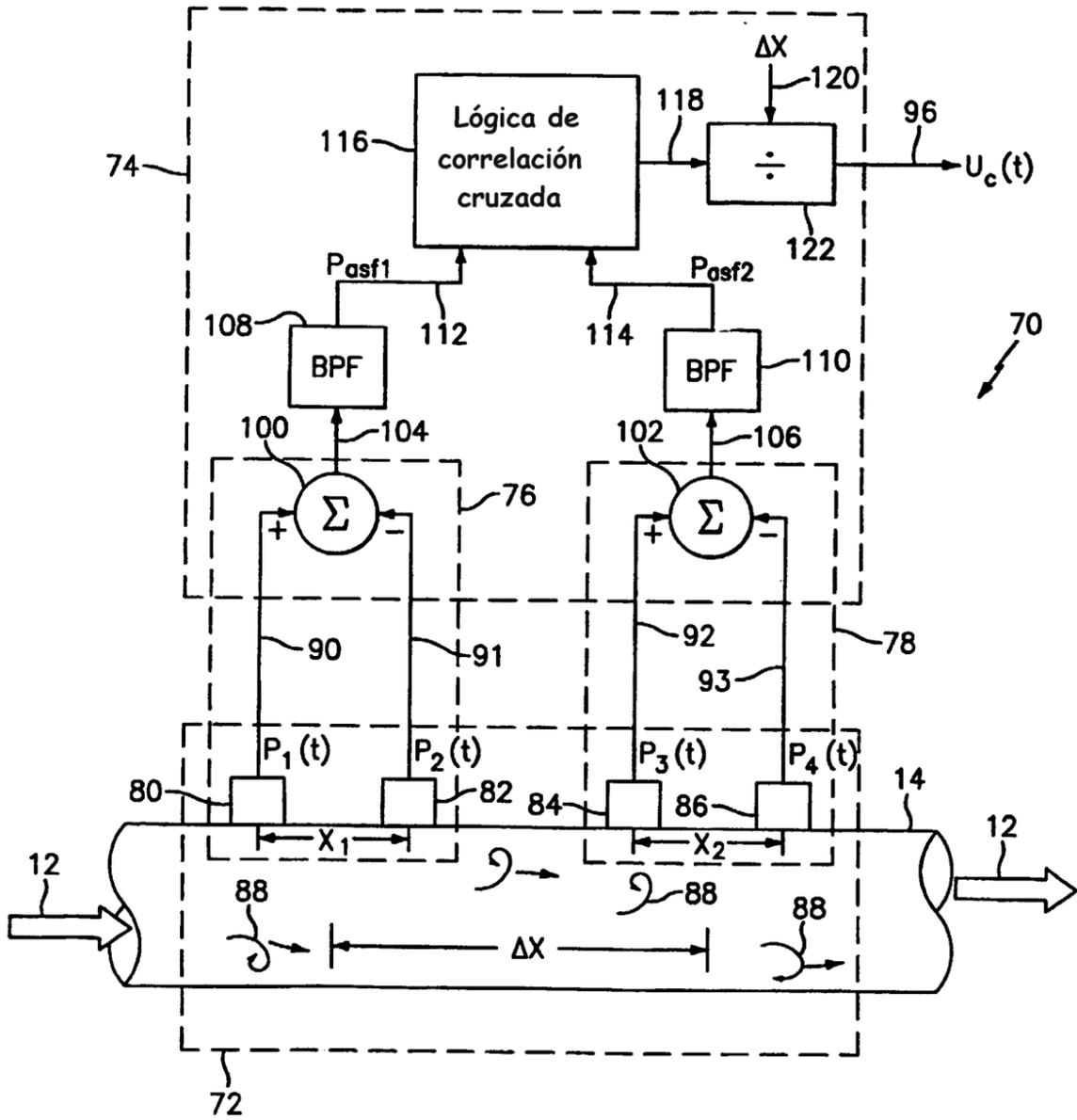
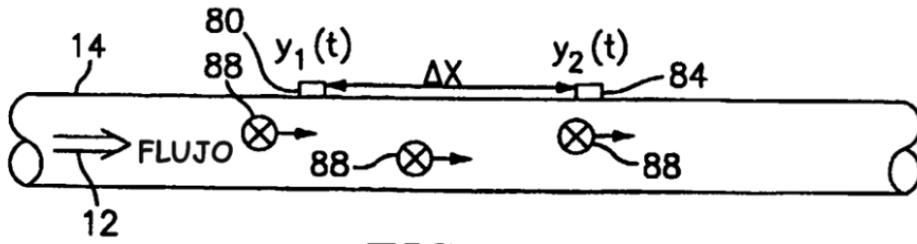
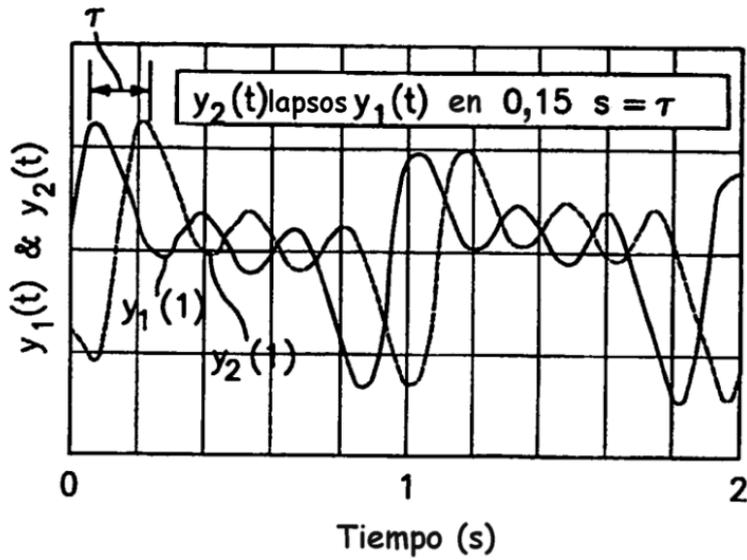


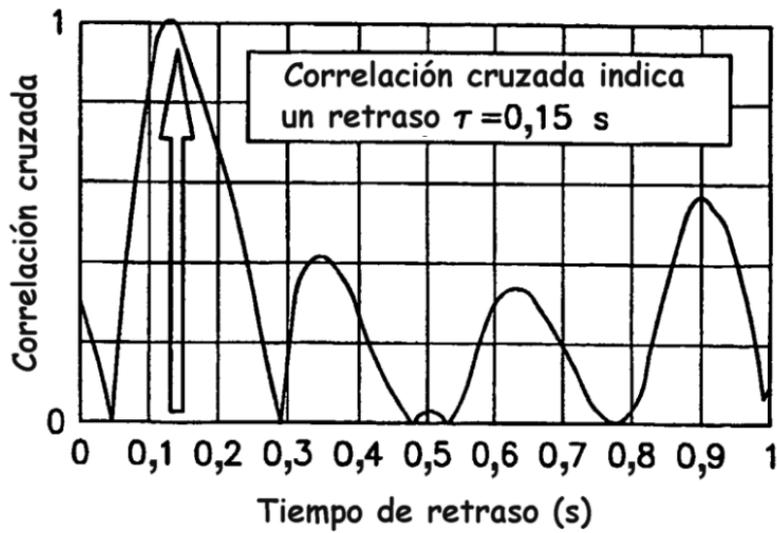
FIG. 14



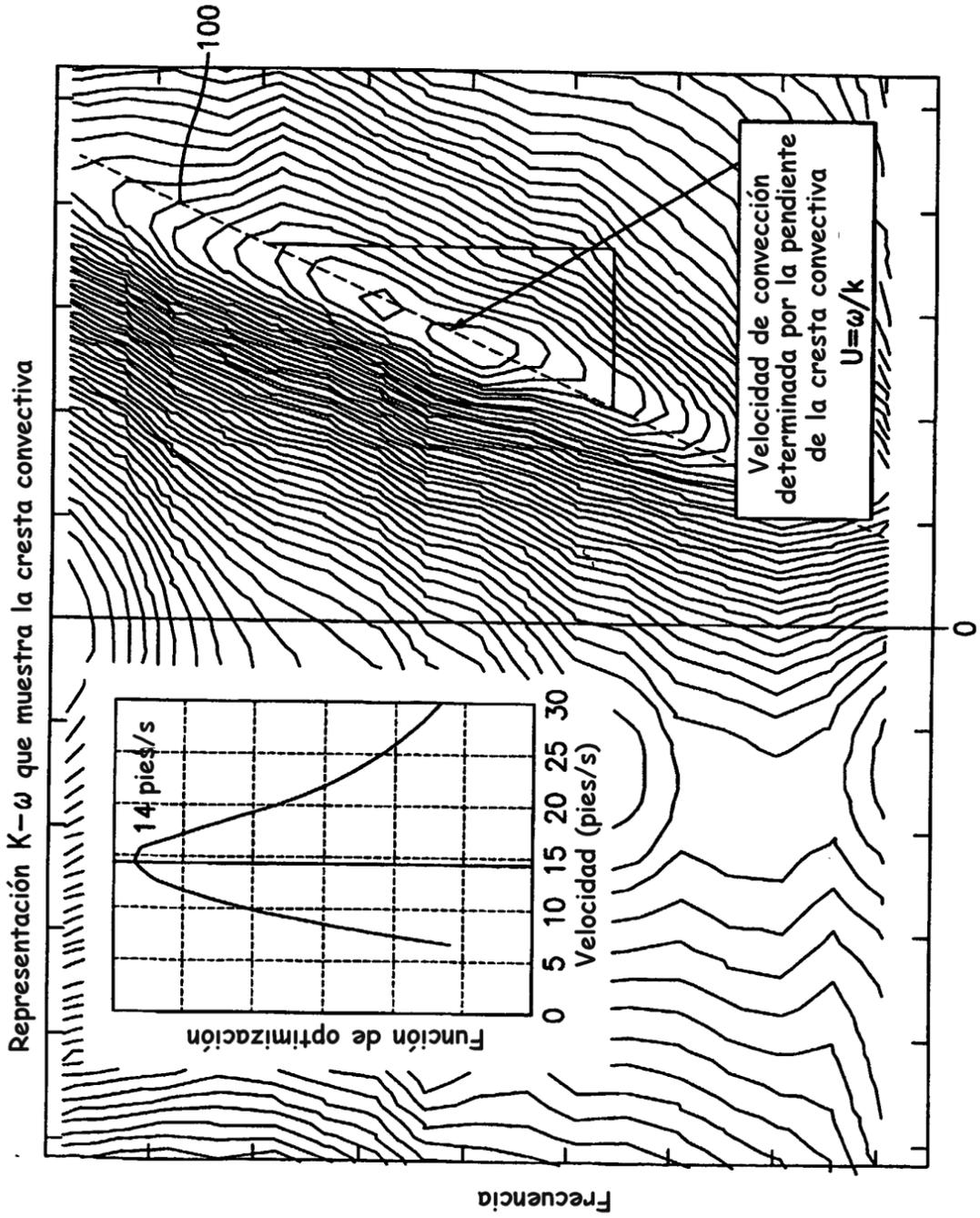
**FIG. 16**



**FIG. 17**



**FIG. 18**



Número de onda

**FIG. 19**

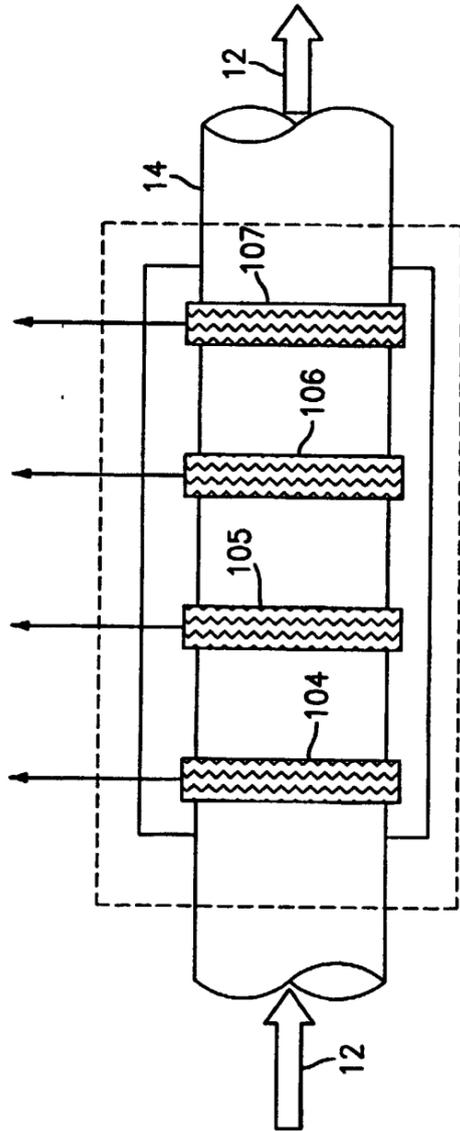


FIG. 20

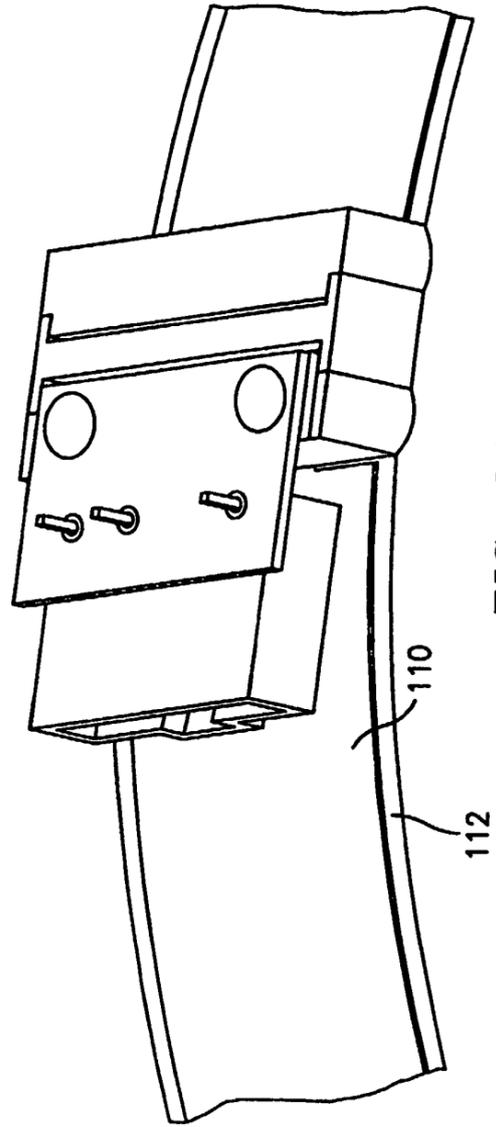


FIG. 21