

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 612 703**

51 Int. Cl.:

G01N 29/024 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.06.2003 PCT/US2003/018576**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.01.2004 WO04003492**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.06.2003 E 03737038 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.11.2016 EP 1523653**

54 Título: **Caracterización no invasiva de un fluido multifase que fluye usando interferometría ultrasónica**

30 Prioridad:

28.06.2002 US 187024

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

18.05.2017

73 Titular/es:

**THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA (100.0%)
LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, LC/IP,
MS A187
LOS ALAMOS, NM 87545, US**

72 Inventor/es:

SINHA, DIPEN, N.

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 612 703 T3

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

DESCRIPCIÓN

Caracterización no invasiva de un fluido multifase que fluye usando interferometría ultrasónica

5 Declaración sobre los derechos federales

Esta invención se ha realizado con el apoyo del gobierno bajo el contrato N.º W-7405-ENG-36 otorgado por el Departamento de energía de los Estados Unidos a los regentes de la Universidad de California. El gobierno tiene ciertos derechos en la invención.

10 Campo de la invención

La presente invención se refiere, en general, a la determinación interferométrica acústica de barrido de frecuencia (SFAI) de la velocidad del sonido y la absorción en fluidos y, más específicamente, al uso de SFAI para determinar de manera no invasiva la velocidad de flujo y la composición de los fluidos que fluyen.

15 Antecedentes de la invención

20 La interferometría acústica de barrido de frecuencia (SFAI) [1] es una adaptación de las técnicas de interferometría ultrasónica desarrolladas hace varias décadas para determinar la velocidad del sonido y la absorción en líquidos y gases. En la técnica original, y también en las modificaciones más recientes de la técnica [2], los transductores (sensores) se colocan en contacto directo con el fluido que se está ensayando. Esto restringió el uso de esta técnica a la caracterización altamente especializada de laboratorio de los fluidos. Por el contrario, la técnica SFAI amplía las capacidades de la técnica de interferometría ultrasónica de manera significativa y permite la determinación no
25 invasiva de la velocidad y la atenuación del sonido en un fluido (líquido, gas, mezclas, emulsiones, etc.) dentro de recipientes sellados (tuberías, tanques, reactores químicos, etc.) en un amplio intervalo de frecuencias. Además, si se conocen las propiedades del material del recipiente (densidad y velocidad del sonido), puede determinarse la densidad del líquido usando la técnica SFAI. También se ha mostrado que es posible identificar de manera única
30 diversos compuestos químicos y sus precursores más significativos basándose en los parámetros físicos del sonido: velocidad, atenuación, dependencia de la frecuencia de la atenuación del sonido y densidad [3].

Las compañías petroleras han mostrado recientemente interés en técnicas no invasivas para caracterizar el flujo de petróleo en las tuberías de los campos de petróleo.

35 La patente de Estados Unidos N.º 5.606.130 [4] indica que se anticipa que las mediciones SFAI descritas en la misma pueden realizarse en muestras que fluyen en tuberías. Sin embargo, no se hace mención en la misma de cómo realizar tales mediciones.

40 La patente de Estados Unidos N.º 5.359.541 (Noah y col.) desvela que pueden determinarse la gravedad específica del soluto y la concentración (después de la calibración) transformando el espectro de resonancia de un recipiente lleno de fluido al dominio del tiempo mediante una FFT y observando la localización del pico en los datos transformados. Noah y col. no enseñan un método adecuado para su uso con un sistema que fluye.

45 La patente de Estados Unidos N.º 5.062.296 (Migliori) enseña cómo puede obtenerse el espectro de resonancia de un objeto sólido y cómo puede usarse este espectro como una firma única de un objeto de tal manera que una comparación con un espectro de referencia puede indicar si un objeto espectro similar tiene cualquier tipo de variación o defectos en el mismo. Esta patente, de manera similar, tampoco enseña a determinar los valores absolutos de las propiedades del líquido, tal flujo de líquido o la composición del líquido.

50 La patente de Estados Unidos N.º 5.606.130 (Sinha y col.) muestra que las características de resonancia de un recipiente lleno de gasolina tienen características de agrupamiento distintas para la gasolina con diferente índice de octanaje. Esta propiedad de agrupamiento de los picos de resonancia se ha usado como una medida del índice de octanaje de la gasolina. Las mediciones presentadas son para muestras estáticas y no para líquidos que fluyen, como se muestra en la figura 1.

55 La patente de Estados Unidos N.º 5.886.262 (Sinha) muestra cómo puede usarse un solo transductor para medir las condiciones de resonancia de un fluido dentro de un recipiente, pero no enseña la medición de un líquido que fluye.

60 La patente europea N.º 1109016 desvela un monitor de propiedad de fluido que incluye un conjunto transductor para impartir energía de múltiples frecuencias a un conducto en uno o más modos y para recibir energía de frecuencia resonante desde el conducto.

En consecuencia, es un objeto de la presente invención proporcionar un aparato y un método para determinar la
65 composición de los fluidos que fluyen.

Otro objeto de la invención es proporcionar un aparato y un método para determinar el caudal de un fluido.

Otros objetos, ventajas y características novedosas de la invención se exponen en parte en la descripción siguiente y en parte se harán evidentes para los expertos en la materia tras el examen de lo siguiente o pueden aprenderse mediante la práctica de la invención. Los objetos y ventajas de la invención pueden realizarse y alcanzarse por medio de los instrumentos y las combinaciones específicamente señalados en las reivindicaciones adjuntas.

5

Sumario de la invención

La presente invención proporciona, de acuerdo con sus objetos y fines, el método para monitorizar la composición de un fluido que fluye a través de un recipiente a un caudal que comprende las etapas de: aplicar una señal acústica periódica continua al exterior del recipiente de tal manera que la señal acústica se transfiere al fluido que fluye, generando de este modo unas características de resonancia de vibración; detectar las características de vibración generadas en el líquido que fluye; barrer la señal acústica periódica continua a través de un intervalo de frecuencias elegido que incluye una parte de una característica de resonancia de vibración; medir la fase de la característica de resonancia de vibración en relación con la de la señal acústica periódica continua que genera de este modo una diferencia de fase; determinar el caudal del fluido; y corregir la fase de la diferencia del caudal del fluido, por la que se identifican los cambios en la composición del fluido.

10

15

La presente invención proporciona también un aparato para monitorizar la composición de un fluido que fluye a través de un recipiente de acuerdo con la reivindicación 2.

20

Los beneficios y ventajas de la presente invención incluyen la medición no invasiva del caudal y los cambios en la composición de un fluido que fluye.

Breve descripción de los dibujos

25

Los dibujos adjuntos, que se incorporan y forman parte de la memoria descriptiva, ilustran una realización de la presente invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención. En los dibujos:

30

La figura 1a es una representación esquemática de una realización del aparato de la presente invención que muestra un transductor de elemento doble localizado en un lado de la tubería o tubo a través del que fluye el líquido; la figura 1b muestra una segunda realización del aparato de la presente invención que muestra el transductor de transmisión en un lado de la tubería o tubo y el transductor de recepción en el otro lado del mismo, y la figura 1c muestra una tercera realización de la presente invención, en la que se usa un único transductor piezoeléctrico para generar tanto una señal oscilatoria en la muestra como para responder a las resonancias producidas por la misma.

35

La figura 2 muestra un ejemplo de un circuito electrónico adecuado para observar la respuesta de resonancia del fluido que fluye a través del tubo o tubería como una función de la frecuencia; un aparato similar sería adecuado para observar los cambios en la fase del fluido a partir de los de la señal de ultrasonido inicial impresa sobre el tubo o tubería por el transductor de transmisión como una función de los cambios en la composición del fluido o en el caudal.

40

La figura 3 es un espectro de resonancia compuesto para una medición no invasiva que usa un aparato de barrido de frecuencia y un método de la presente invención, e ilustra que los picos de líquido pueden estudiarse independientemente de las resonancias inducidas en la pared del recipiente si se selecciona una región de frecuencia apropiada.

45

La figura 4 es una gráfica de las propiedades físicas de varios líquidos medidos en un recipiente estático.

La figura 5 muestra unas mediciones de interferometría acústica de barrido de frecuencia realizadas bajo condiciones de flujo, que muestran que la velocidad del sonido que está relacionada con la separación entre los picos de resonancia consecutiva no cambia como resultado del flujo, ni tampoco la atenuación de sonido que está relacionada con la anchura de los picos de resonancia.

50

La figura 6 muestra unas mediciones de interferometría acústica de barrido de frecuencia realizadas en un líquido que contiene burbujas; de nuevo, la separación entre los picos no cambia.

La figura 7 es una gráfica de la magnitud de fase diferencial medida como una función del flujo de masa para el agua.

55

La figura 8 muestra los patrones de resonancia para el agua y el petróleo como una función de la frecuencia e ilustra que a una frecuencia apropiada las características de los picos de resonancia son sensibles a las propiedades acústicas del líquido.

Descripción detallada

60

En resumen, la presente invención incluye un aparato y un método para monitorizar de manera no invasiva el flujo y/o la composición de un fluido que fluye usando ultrasonidos. En lo que sigue, el fluido se definirá como un líquido, que incluye líquidos con más de un constituyente, líquidos con algunas partículas y los que contienen burbujas de gas. Como se describirá en detalle a continuación en el presente documento, se encontró que la posición de los picos de resonancia para un fluido excitado por una señal ultrasónica de barrido de frecuencia cambia la frecuencia, tanto en respuesta a un cambio en la composición como en respuesta a un cambio en la velocidad de flujo. Además, la diferencia de frecuencia entre picos de resonancia sucesivos no cambia como una función del flujo, sino que más

65

bien en respuesta a un cambio en la composición. De este modo, una medición de ambos parámetros (posición de resonancia y separación de resonancia), una vez calibrada, permite la determinación simultánea del caudal y la composición usando el aparato y el método de la presente invención. Los parámetros adicionales útiles para determinar la composición de fluido incluyen la anchura total a la mitad del máximo de una característica de resonancia, la relación de amplitud y la impedancia acústica del líquido. Ninguno de estos parámetros cambió significativamente como una función del caudal. El aparato se ensayó usando soluciones de decano, dodecano, agua y salmuera para determinar si estas composiciones se distinguen fácilmente usando la técnica de interferometría acústica de barrido de frecuencia (SFAI) que se ha descrito en detalle para los fluidos estáticos en la patente de Estados Unidos N.º 5.767.407 [1] y en la patente de Estados Unidos N.º 5.886.262 [5], las enseñanzas de ambas referencias se incorporan como referencia en el presente documento.

A continuación se hará referencia en detalle a las presentes realizaciones preferidas de la invención, ejemplos de las mismas se ilustran en los dibujos adjuntos. Las estructuras similares o idénticas se etiquetan usando idénticas leyendas. Volviendo ahora a la figura 1a, se muestra una representación esquemática de una realización del aparato de la presente invención que ilustra un transductor de dos elementos o dos transductores de un elemento 10a y 10b localizados en un lado de la tubería o tubo 12 a través de los cuales el fluido, 14, fluye y la electrónica, 16, proporciona la frecuencia de accionamiento de acústica fija o variable, 18, y recibe la señal de resonancia, 20, generada en el fluido 14. La figura 1b muestra una segunda realización del aparato de la presente invención que muestra el transductor de transmisión 10a alimentado por el generador de barrido de onda sinusoidal 20, en un lado de la tubería o tubo 12 y el transductor de recepción 10b en conexión eléctrica con la electrónica de recepción y análisis 22, en el otro lado del mismo. Ejemplos de la circuitería y los principios de funcionamiento se encuentran en la descripción para la patente '232, *supra*. Para la excitación de una sola frecuencia de las resonancias dentro del fluido 14, puede monitorizarse el cambio en la fase por el aparato. Como se demostrará más adelante en el presente documento, el tubo o tubería 12 puede fabricarse a partir de metales, plásticos o vidrio. La figura 1c muestra una tercera realización de la presente invención, en la que se usa un único transductor piezoeléctrico, 24, para generar tanto una señal oscilatoria en la muestra como para responder a las resonancias producidas por la misma. Como se describe también en la descripción de la patente '262, *supra*, la conexión de puente 26 se emplea para derivar una señal diferencial e incluye un brazo que contiene el transductor 24, un brazo de equilibrado que contiene un circuito coincidente o equivalente para el transductor, y un generador de barrido de onda sinusoidal. Cuando el transductor no está unido a la tubería, la salida es cero; sin embargo, cuando se une a la tubería, una impedancia de tubería cambiante debida a las ondas estacionarias generadas en la misma genera una señal de un brazo en relación con la del otro brazo y la salida es la diferencia entre estos valores.

Para la medición del caudal, es necesario corregir los cambios en la composición del fluido, o al menos tener el conocimiento de que la composición no está cambiando. Existen numerosos dispositivos de monitorización de composición disponibles comercialmente que incluyen dispositivos en línea en tiempo real tales como espectrómetros de infrarrojos y espectrómetros uv/vis, como ejemplos, y dispositivos de muestreo tales como cromatógrafos de líquidos y espectrómetros de masas como ejemplos. Uno podría tomar una muestra para su análisis usando una jeringa introducida a través de un tabique para su análisis fuera de las instalaciones. Otro procedimiento sería detener el flujo y utilizar el procedimiento SFAI detallado en la Referencia 1. Debido al número y la variedad de estos métodos, las figuras 1a-1c no muestran ningún dispositivo para monitorizar la composición del fluido que fluye; excepto para aquellos enseñados por la presente invención reivindicada. De manera similar, para monitorizar la composición del fluido; ciertas realizaciones de la presente invención requieren que se realice una corrección a la localización del pico de resonancia para el caudal de fluido, o al menos que se conozca que el caudal es constante. Existen numerosos y variados dispositivos de medición de flujo comercialmente disponibles, algunos dispuestos en el interior de una tubería a través de la que está fluyendo el fluido, y otros dispuestos en el exterior de la tubería. De nuevo, no se ilustran dispositivos de medición de flujo en las figuras 1a-1c, excepto para aquellos enseñados por la presente invención reivindicada, por la misma razón que no se muestra el aparato de monitorización de composición de fluido.

La figura 2 muestra un ejemplo de un circuito electrónico adecuado para observar la respuesta de resonancia del flujo que fluye 14 a través del tubo o tubería 12 como una función de la frecuencia; un aparato similar sería adecuado para observar los cambios en la fase del fluido a partir de los de la señal de ultrasonido inicial impresa sobre el tubo o tubería por el transductor de transmisión como una función de los cambios en la composición del fluido y/o los cambios en el caudal del fluido. El circuito electrónico comprende un CI de sintetizador digital directo (DDS), 28, para generar frecuencias de hasta 10 MHz; un amplificador 30, para amplificar la señal de salida del transductor 10b; un detector de fase 32, para proporcionar una salida de tensión proporcional a la diferencia de fase entre dos ondas sinusoidales; un convertidor analógico a digital (A/D), 34, que tiene un mínimo de capacidad de multiplexación de dos canales, 36 MUX (multiplexor); un microcontrolador, 38 que tiene un cálculo de punto flotante y capacidad de transformada rápida de Fourier (FFT); y una unidad de visualización, 40, para visualizar los resultados. Los dos transductores utilizados eran transductores piezoeléctricos comerciales listos para usarse (transductores de 1,27 cm (0,5 pulgadas) de diámetro de frecuencia central de 5 MHz de Panametric Videoscan). La marca real no es crítica para las mediciones y puede emplearse casi cualquier transductor.

El microcontrolador 38 es software programable y controla el DDS 28 para generar ondas sinusoidales que tienen una frecuencia elegida dentro del intervalo de frecuencia del dispositivo. La salida de frecuencia del DDS 28 puede o

ser fija o variada en el tiempo (es decir, barrida). La resolución de frecuencia del aparato usado para demostrar la presente invención fue mejor que 0,1 Hz. La frecuencia podría barrerse en un intervalo de frecuencia elegido de una fracción de segundo.

5 La salida del DDS se usa para excitar el transductor transmisor 10a colocado en contacto físico con la tubería 10 a través de la que puede fluir el líquido 14. El segundo transductor 10b se usa como receptor. También es posible usar un único transductor y medir el cambio de impedancia del mismo (figura 1c del presente documento) para realizar el mismo tipo de medición. Sin embargo, para la presente descripción, es más sencillo tratar las dos realizaciones del transductor separadas que están colocadas en contacto físico con la tubería 12, o en el mismo lado de la misma en la proximidad de la otra o en lados opuestos de la tubería 12. El transductor receptor 10b recibe la respuesta de señal del fluido/tubería a la señal de excitación procedente del transductor 10a que está amplificada por el amplificador 30 con una ganancia de hasta 60 dB. La señal amplificada se procesa usando la entrada de multiplexación 36 del convertidor A-D 34. El microcontrolador 38 controla la conmutación de la entrada del multiplexador 36 y la salida de datos procedente del convertidor A-D 34.

15 Para las mediciones de fase, se emplea un circuito detector de fase 32 que tiene como salida la diferencia de fase entre la señal para el transductor transmisor 10a y la señal amplificada del transductor receptor 10b. Normalmente, las mediciones de fase se realizan a una frecuencia fija que corresponde a un pico de resonancia cuando no hay flujo de líquido a través de la tubería. Cuando se permite que el líquido fluya, la salida del detector de fase se relaciona con la magnitud del flujo. No existe una relación simple para describir la diferencia de fase como una función del flujo y se requiere una calibración. La diferencia de fase observada es una función aproximadamente lineal del flujo (véase la figura 7 del presente documento). El microcontrolador 38 puede monitorizar continuamente la salida de fase y convertirla a un valor de flujo y visualizar los resultados usando la pantalla 40.

25 Para monitorizar la composición del fluido, el circuito conmuta al canal que dirige la salida de señal de transductor receptor amplificada al convertidor A/D 34. Para esta medición, la frecuencia aplicada para el transductor transmisor se barre rápidamente a través de un intervalo de frecuencias elegido. Este intervalo depende de las dimensiones de la tubería (véase la figura 3 del presente documento). Aunque puede emplearse cualquier intervalo de frecuencias conveniente, prefiere usarse un intervalo de frecuencias entre dos resonancias de pared sucesivas (véase la figura 3 del presente documento). Esto produce una línea base plana y los resultados pueden ajustarse a una teoría que implica ecuaciones simples. Se da a continuación una breve descripción de las relaciones.

35 Como se ha indicado anteriormente en el presente documento, con el fin de obtener fácilmente las propiedades acústicas de un fluido, es conveniente seleccionar un intervalo de frecuencias de medición para evitar las contribuciones de resonancia de las paredes (aproximadamente 4, 6 y 8 MHz como ejemplos en la figura 3). En primer orden, esto reduce el análisis esencialmente al de la transmisión de sonido a través de un modelo de una capa que hace los cálculos más directos sin introducir errores sustanciales en la medición de la velocidad del sonido y de la atenuación del sonido. Esto es similar a evitar la región de frecuencia de resonancia de cristal del transductor en la interferometría tradicional. El coeficiente de transmisión de intensidad, T , para el caso de una única capa de fluido que tiene una longitud de trayectoria L , un coeficiente de atenuación α_L ($\alpha_L L \ll 1$) y una velocidad del sonido, c_L , entre dos límites de pared idénticos, puede expresarse como

$$T = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2} \sigma \alpha_L L\right)^2 + \frac{\sigma^2 - 4}{4} \text{Sen}^2\left(\frac{\omega}{c_L} L\right)}, \quad (1)$$

45 donde, $\sigma = z_w/z_L + z_L/z_w$, $\omega = 2\pi f$, es la frecuencia angular, y z_w y z_L son la impedancia acústica de la pared y del fluido, respectivamente. Para la mayoría de los líquidos dentro de un recipiente metálico, $\sigma \approx z_w/z_L$. T en la Ecuación (1) es una función periódica de $\omega L/c_L$ y alcanza un valor máximo (pico) siempre que se satisface la condición $2\pi f_n L/c_L = n\pi$, donde f_n es la frecuencia del n-ésimo pico. A partir de esta condición, puede determinarse la velocidad del sonido c_L ($c_L = 2 L \Delta f$) si se mide la diferencia de frecuencia entre picos sucesivos.

50 Como se ha indicado, la velocidad del sonido en el fluido se determina a partir de la separación de frecuencia entre dos picos consecutivos. Por lo tanto, es necesario barrer la frecuencia a lo largo de un intervalo que abarca dos picos de resonancia sucesivos cualquiera. Los datos digitalizados de los dos picos de resonancia pueden usarse a continuación para extraer la velocidad del sonido ya que se conoce la longitud de la trayectoria del líquido (el diámetro del tubo). Esta es la manera más conveniente para determinar la velocidad del sonido en el fluido, y la medición puede realizarse en una fracción de segundo. Si se requiere o mayor precisión o resolución, puede usarse un segundo enfoque. En este enfoque, cubre un intervalo de frecuencias mucho mayor de tal manera que se observan picos de resonancia múltiples (digamos, 10). El microcontrolador se usa para realizar una FFT de los datos que determina la periodicidad de los picos de resonancia que está directamente relacionada con la separación de los picos. Esto es equivalente a promediar la medición de la velocidad del sonido sobre múltiples separaciones de pico.

La atenuación del sonido y la densidad del líquido están relacionadas con el espectro de frecuencias. La relación de los coeficientes de transmisión mínimo, T_{min} y máximo, $T_{máx}$, puede expresarse en términos de σ y α_L como:

$$\frac{T_{min}}{T_{máx}} = \frac{2}{\sigma} + L \alpha_L (f^2). \quad (2)$$

5 La ecuación (2) ilustra que tanto α_L como σ pueden determinarse a partir de un ajuste lineal de los datos del factor de relación de transmisión Como una función de f^2 . El intercepto a frecuencia cero está relacionado con la relación de impedancia acústica σ . Si se conoce la impedancia del material de pared, puede determinarse la densidad del líquido ya que la velocidad del sonido del fluido se determina independientemente de cómo se ha tratado anteriormente en el presente documento.

10 Otro para determinar el coeficiente de atenuación acústica es utilizar el ancho de banda de media potencia de los picos de resonancia observados. A partir de la Ecuación (1), puede derivarse una solución inversa para el ancho de banda de media potencia, δf , en términos de propiedades acústicas del fluido de acuerdo con

$$\delta f = \frac{2 c_L}{\pi \sigma L} + \frac{c_L \alpha_L (f^2)}{\pi}. \quad (3)$$

15 Similar a la Ecuación (2), el segundo término es la contribución de la absorción acústica del líquido y es idéntico a la solución obtenida a partir de la teoría de resonador de los transductores en contacto directo con el líquido. El primer término, la anchura extrapolada a la frecuencia cero δf_0 , es independiente de la frecuencia y depende de σ , c_L y L . Este término resulta de la pérdida de reflexión en la interfaz pared-líquido debido a la falta de coincidencia de impedancia acústica y puede usarse para determinar la densidad del líquido si se conoce la impedancia acústica de la pared. Este análisis puede usarse para extraer el valor absoluto de la absorción acústica del líquido. Más frecuentemente, es suficiente la monitorización de la anchura de pico para los picos de resonancia para el petróleo y el agua (véase la figura 8 del presente documento) para obtener una discriminación cualitativa. El ancho de resonancia es el ancho total a la mitad del máximo del pico, y el microcontrolador puede calcular rápidamente esta cantidad ajustando la parte superior de cualquier pico con una forma de línea Lorentziana. El Lorentziano puede linealizarse invirtiendo (tomando el recíproco de la amplitud en cada frecuencia) los datos y a continuación un ajuste parabólico simple es todo lo que es necesario en lugar de un ajuste de mínimos cuadrados no lineal. La anchura indicada para el petróleo crudo en la figura 8 se refiere solo a la descripción cualitativa.

20 Por lo tanto, el espectro contiene toda la información relacionada con el líquido, cualquier parámetro deseado puede extraerse mediante cálculos simples.

25 La descripción anterior cubre el comportamiento de la transmisión de sonido a través de una trayectoria de fluido en función de la frecuencia y la Ecuación (1) describe el espectro de frecuencia. Es posible que los mínimos cuadrados ajusten esta ecuación a datos experimentales observados para extraer diversos parámetros del fluido, tales como la velocidad del sonido, la absorción acústica y la densidad. Sin embargo, también es posible obtener la misma información con buena exactitud incluso monitorizando un solo pico de resonancia. En la práctica, a menudo se requiere monitorizar el cambio en la calidad del fluido, en términos de velocidad del sonido, absorción de sonido y variación de densidad, que fluye a través de una tubería y no valores absolutos de estas cantidades. En una situación de este tipo, un circuito electrónico selecciona y rastrea simplemente un único pico de resonancia y mide la anchura de pico, la posición de pico y el valor mínimo (la línea base) de la curva de resonancia.

30 Si cambia la velocidad del sonido del fluido, la posición de pico de resonancia seleccionada cambiará en frecuencia. Este desplazamiento de frecuencia (Δf_s) está relacionado con la variación de la velocidad del sonido (Δc) simplemente como $\Delta f_s = (n/2L) \Delta c$. En este caso n , es el número de orden del pico de resonancia específico. De manera similar, si la absorción acústica del líquido cambia entonces la diferencia observada en el valor de la anchura total a mitad de la máxima (δf) del pico de resonancia para un pico de resonancia elegido $\Delta (\delta f)$ proporciona el cambio en la absorción acústica como $\Delta (\delta f) \approx (\Delta c/\pi) \Delta \alpha$. Otro método para determinar el cambio en la absorción acústica es medir la relación del mínimo de pico de resonancia, T_{min} con el máximo de pico, $T_{máx}$ para una característica de resonancia única. El cambio en la absorción $\Delta \alpha = \Delta (T_{min} / T_{máx})/L$ (véase la ecuación (2) y la figura 8 del presente documento). Este enfoque proporciona un procedimiento más rápido para determinar $\Delta \alpha$ y no requiere un ajuste de curvas.

35 Finalmente, la variación en el mínimo (T_{min}) de la curva de resonancia puede proporcionar una medida de la variación en el cambio en la impedancia acústica del líquido. La relación entre los dos parámetros puede expresarse como $\Delta T_{min} = (2/Z_w) \Delta Z$, donde ΔZ es el cambio en la impedancia acústica del líquido. Todas estas relaciones se derivan de la Ecuación (1), y se muestran gráficamente en la figura 8 del presente documento con fines descriptivos. Para la monitorización cualitativa de la variación en la absorción acústica, por ejemplo, para la discriminación simple entre petróleo y agua, es conveniente determinar simplemente la anchura del pico de resonancia entre el máximo y

el mínimo de la resonancia como se muestra en la figura 8. Para una determinación precisa de la absorción acústica, es mejor ajustar el espectro de resonancia con varios picos usando la Ecuación (1).

5 Mediante el empleo de un circuito de bucle de bloqueo de fase que monitoriza simultáneamente tanto la posición de
 pico de resonancia de un único pico como la anchura de pico en la región de frecuencia más sensible, se
 proporcionan continuamente tanto la velocidad del sonido como la atenuación del sonido. Estos valores se usan a
 continuación para caracterizar el fluido como en el caso de la SFAI. Con un circuito adicional, puede monitorizarse la
 densidad del líquido. El bloqueo de fase se logra usando una señal de onda de diente de sierra para variar la
 10 frecuencia del transductor de excitación alrededor de la frecuencia de resonancia deseada de un solo pico de
 resonancia. El pico de resonancia se monitoriza como una función del tiempo y proporciona una medida de la
 velocidad del sonido debido a que se conoce el diámetro de la tubería. En este caso, no es necesario determinar la
 separación de frecuencia entre dos picos consecutivos cualquiera debido a que el espectro de resonancia está
 determinado por la longitud de la trayectoria (el diámetro de la tubería o del tubo) y la velocidad del sonido del
 líquido. Por lo tanto, la posición de un único pico conocido determina la velocidad del sonido. La salida de la
 15 modulación de frecuencia es una señal que se modula en amplitud a medida que se barre a través de un pico de
 resonancia. Si la resonancia es aguda entonces la modulación de amplitud a lo largo de la región de barrido de
 frecuencia corta es de amplitud alta con un valor de amplitud mediana alto. Para picos de amplitud baja o de
 resonancia ancha, la señal de salida es de un valor mediano más bajo con salidas de amplitud más bajas. Por lo
 tanto, midiendo el valor de RMS de la señal y de la CA, acoplándolo de tal manera que se filtra el valor mediano de
 20 CC, es posible obtener la anchura del pico de resonancia. El valor mediano de CC proporciona una medida de la
 densidad del líquido.

La figura 3 es un espectro de resonancia compuesto para una medición no invasiva usando el aparato de barrido de
 25 frecuencia y el método de la presente invención sobre un recipiente que tiene un espesor de pared finito e ilustra que
 los picos de líquido pueden estudiarse independientemente de las resonancias inducidas en la pared del recipiente
 si se selecciona una región de frecuencia apropiada. La gráfica siguiente muestra cómo se ve un espectro típico
 cuando se realiza una medición de barrido de frecuencia desde el exterior de un recipiente con un espesor de pared
 finito.

30 La figura 4 es una gráfica de las propiedades físicas de varios líquidos medidos en un recipiente estático. El decano
 y el dodecano fueron investigados ya que se sabe que ambos líquidos tienen propiedades similares a las del
 petróleo. Acústicamente, estos líquidos están muy separados. La velocidad del sonido y los valores de atenuación
 se resumen en la TABLA.

Líquido	Velocidad del sonido m/s	Densidad g/cm ³	Atenuación $n \text{ Np m}^{-1} \text{ s}^2 \times 10^{14}$
Decano	1263	0,73	5,7
Dodecano	1300	0,75	6,3
Agua	1483	1,00	2,5
Agua + 18 % (NaCl)	1550	1,01	6,0
	1585	1,02	30,0
Agua + 26 % (NaCl)			

35 La resolución para la velocidad del sonido para la técnica SFAI de la presente invención es aproximadamente de ± 2
 m/s; esto puede mejorarse a 0,1 m/s, si es necesario. Esta diferencia entre el decano y el dodecano permite
 identificarlos. Diferenciar entre agua, salmuera y decano (o dodecano) es sencillo. Los mismos datos se presentan
 en una gráfica tridimensional en la figura 3 para mayor claridad.

40 Estudios recientes sobre la velocidad del sonido en hidrocarburos puros y mezclas que usan la técnica de eco de
 pulso tradicional de Wang y Nur [5] muestran que la velocidad del sonido en 13 n-alcanos, 10 1-alquenos y 3
 hidrocarburos de naftena disminuye linealmente con la temperatura con pendientes que van desde -3,43 a -4,85
 (m/s)/°C en un intervalo de temperatura entre -12° a 132 °C. Por lo tanto, si se conoce la temperatura, puede
 45 corregirse la velocidad del sonido para la temperatura. En un estudio separado [6] se muestra que la velocidad del
 sonido c para los hidrocarburos puede expresarse en función de la temperatura T y del peso molecular M en
 unidades de masa atómica como:

$$c = c_0 - \left(0,306 - \frac{7,6}{M} \right) T$$

50 donde, c_0 es una constante. Esto demuestra que debería ser posible identificar diversos hidrocarburos usando la
 velocidad del sonido si esta cantidad puede medirse con precisión.

Además de la velocidad del sonido, la técnica SFAI puede determinar también la absorción acústica en los fluidos, lo que proporciona un parámetro físico adicional para la caracterización del petróleo. Los hidrocarburos también muestran una pronunciada absorción acústica dependiente de la frecuencia. La técnica SFAI de la presente invención también es capaz de este tipo de medición.

Se utilizó un bucle de flujo para realizar las mediciones SFAI en condiciones de flujo. Se usó un tubo de plástico de 11,43 cm (4,5 pulgadas) de diámetro en el bucle de flujo. Se usó agua para el líquido porque es más fácil de trabajar que el petróleo crudo. La medición también se realizó con petróleo vegetal. La figura 5 muestra las mediciones bajo condiciones de flujo entre 0 y 20 gal/min de agua. Se observa que la separación entre los picos de resonancia consecutivos es la misma para el agua que fluye y para el que no fluye. Esto indica que la velocidad del sonido no cambia cuando el líquido está fluyendo. También se observa que la anchura de los picos de resonancia es la misma, lo que indica que la atenuación sonora también permanece invariable bajo condiciones de flujo. La diferencia entre los dos espectros es un ligero desplazamiento de todo el patrón en frecuencia.

Se cree que el desplazamiento de frecuencia se debe a una ligera variación en las propiedades acústicas del fluido debido a la capa límite de flujo formada adyacente a la superficie interior de la pared. Esta capa límite tiende a introducir un desplazamiento de fase de las ondas sonoras que se reflejan desde la pared, lo que puede afectar al patrón de onda estacionaria formado dentro de la longitud total de la trayectoria del fluido. El desvío de línea base a mayor amplitud hacia el lado de la frecuencia más alta de la figura es un resultado del hecho de que los datos presentados están algo cerca de un pico de resonancia de la pared (véase la figura 3). Se ha observado que la constancia de la velocidad del sonido se observa desde la FFT de los datos.

La figura 6 muestra que las mediciones SFAI requeridas para determinar la velocidad del sonido pueden realizarse con fluidos que contienen burbujas de gas. Para esta medición, se hizo burbujear gas nitrógeno a través del fondo de un tubo de Plexiglas de aproximadamente 5,08 cm (2 pulgadas) de diámetro, y las mediciones se hicieron uniéndolos dos transductores en el exterior del tubo. Debe señalarse que la separación de frecuencia entre los picos de resonancia consecutivos no cambia significativamente, y que el espectro puede observarse claramente (las mediciones se hicieron con poco tiempo de integración (~ 1 ms)); por otra parte, la periodicidad todavía puede determinarse en tasas relativamente altas de propagación. Esto indica que la velocidad del sonido no cambia apreciablemente hasta que la fracción de volumen de las burbujas es grande cuando la tasa de burbujeo es demasiado alta. Si la integración de la medición se aumenta en un factor de 10, se encuentra que la relación de señal a ruido de los datos mejora considerablemente, y se encuentra que el patrón observado para el líquido que burbujea es similar al del mismo líquido sin introducir burbujas. Esto es porque se promedian todas las fluctuaciones debidas a las burbujas en las mediciones, y hasta una cierta tasa de burbujas, las mediciones SFAI son todavía bastante fiables.

La figura 7 es una representación gráfica del desplazamiento en el ángulo de fase como una función del flujo de masa, lo que demuestra que el aparato de la presente invención es útil como un medidor de flujo no invasivo; es decir, uniéndolos transductores al exterior de una tubería existente, puede monitorizarse el flujo del fluido en el mismo.

Para monitorizar en tiempo real (continuo), se ha descubierto que es más útil seleccionar un solo pico de resonancia a una frecuencia apropiada. La figura 8 es una representación gráfica de la amplitud de resonancia como una función de la frecuencia para el petróleo crudo (trazo superior) y de agua (trazo inferior) en una tubería de vidrio de 5,08 cm (2 pulgadas) de diámetro. En el intervalo de frecuencias entre 3,78 y 3,8 MHz (encerrada por el rectángulo), la cavidad de resonador específica (el interior de la tubería) alcanza su máxima sensibilidad en términos de monitorizar los cambios en la velocidad del sonido. Hay muchas de tales frecuencias dispersadas de una manera regular. Se observa un desplazamiento de frecuencia de 5 kHz entre los datos para el petróleo crudo y el agua. La técnica SFAI de la presente invención puede resolver fácilmente 1 Hz, permitiendo de este modo una resolución de la velocidad del sonido de 1 parte en 5000. Además del desplazamiento en la frecuencia, la anchura de resonancia también cambia dramáticamente lo que indica una gran variación en la absorción del sonido. Además, el mínimo de la resonancia también cambia debido a un cambio en la falta de coincidencia de impedancia acústica y puede estar relacionado con la densidad del líquido. La circuitería electrónica se ha desarrollado de tal manera que puede monitorizar los tres parámetros de una manera continua. El desplazamiento en la línea de base para las dos representaciones gráficas (agua y petróleo crudo) se debe al hecho de que la impedancia acústica es diferente para los dos fluidos. El valor mínimo de la resonancia proporciona una medida de la densidad del fluido que puede derivarse de la falta de coincidencia de impedancia acústica entre la pared del tubo y el fluido en el interior.

Por lo tanto, se ve que la localización de frecuencia de los picos de resonancia varía como una función tanto de la composición del fluido como de su caudal. Si se desea un medidor de flujo, la composición debe determinarse para que sea constante; esto puede lograrse monitorizando el pico de separación para determinar que la velocidad del sonido del fluido permanece relativamente constante para la calibración *in situ*. La calibración también puede realizarse usando una pequeña sección de la misma tubería y un líquido conocido en otro lugar en cualquier sistema de flujo para derivar la información de calibración. En la calibración de flujo, cualquier pico de resonancia en un intervalo de frecuencia deseado (preferentemente en el intervalo de frecuencia en el medio de dos picos de resonancia de la pared) se monitoriza como una función del flujo del líquido. Las posiciones de los picos de resonancia de la pared se determinan por el espesor de la pared. El presente aparato puede calibrarse tanto para

mediciones de alta como de baja sensibilidad de la siguiente manera: para las frecuencias bajas (aproximadamente de 1 MHz), el desplazamiento de los picos de resonancia es menor que el desplazamiento observado en las frecuencias mucho más altas (aproximadamente de 10 MHz). Mediante la observación de diversos intervalos de frecuencia, es posible obtener diferentes niveles de sensibilidad. Este proceso de calibración no es diferente al de otros medidores de flujo ultrasónicos de tiempo de tránsito donde debe determinarse la velocidad del sonido del fluido. Una vez que el aparato se calibra para el flujo, entonces tanto la velocidad del sonido (y la absorción de sonido) como el flujo del fluido pueden monitorizarse simultáneamente si no se desea una gran precisión en la medición. Para muchas aplicaciones prácticas, tales como la monitorización del flujo y la composición en la industria del petróleo (productos derivados del petróleo), una calibración de flujo de petróleo proporciona una precisión adecuada. También es posible, en principio, extender la calibración de flujo de un líquido, por ejemplo, agua a petróleo. La figura 8 ilustra la diferencia en los picos de resonancia para el petróleo y el agua. Las anchuras de los picos de resonancia son diferentes para los dos líquidos, y cada líquido puede identificarse basándose en las características de resonancia de un solo pico de resonancia. Por lo tanto, una vez que la calibración de flujo se completa para el petróleo y por separado para el agua, es posible extrapolar el caudal cuando el fluido que fluye es una combinación de los dos líquidos, porque esta cantidad es intermedia entre las dos calibraciones. Esto es posible porque la composición puede monitorizarse a partir de una medición de la separación de pico o por una FFT de los datos de resonancia, mientras que el flujo se mide mediante el seguimiento de la posición de un único pico de resonancia. Estas dos mediciones son, en gran medida, independientes entre sí en la práctica.

La presente invención proporciona información tanto en caudales bajos como altos. Ya que el desplazamiento de frecuencia de los picos debido a que el flujo aumenta con la frecuencia, para caudales bajos es conveniente usar un intervalo de frecuencia más alto (≥ 5 MHz), donde un caudal pequeño produce un desplazamiento medible en la frecuencia de pico o en el desplazamiento de fase de cualquier pico de resonancia seleccionado. Por el contrario, para caudales más altos, el desplazamiento de pico de resonancia puede ser grande y uno puede perder la pista del pico seleccionado que es equivalente a exceder un desplazamiento de fase de 360 grados. En este caso, es conveniente observar los datos en una región de frecuencia más baja (≈ 1 MHz). Los intervalos de frecuencia apropiados dependen de la geometría de la tubería específica y pueden determinarse durante el proceso de calibración inicial donde se emplea una exploración de frecuencias de banda ancha para determinar las características de la tubería (véase la figura 3 del presente documento). Como se ha mencionado anteriormente en el presente documento, es preferible usar las regiones de frecuencia entre dos frecuencias de resonancia de la pared, para monitorizar tanto el flujo como la composición.

Para una calibración del sistema de flujo, las mediciones (amplitud de señal del receptor y diferencia de fase) se realizan con un líquido que fluye para varios valores de flujo y se monitoriza todo el espectro de frecuencias. Una vez hecho esto, se extrae la información de calibración para los intervalos de alta y baja frecuencia de estos espectros y se almacena en el microcontrolador como términos de ecuaciones simples. A continuación, puede interpolarse a partir de este valor para una medición real.

Una vez que el aparato se calibra para el flujo, tanto la velocidad del sonido (y la absorción de sonido) como el flujo de fluido pueden monitorizarse de manera simultánea si no se desea una gran precisión en la medición. Para monitorizar el flujo y la composición de los productos derivados del petróleo, una calibración de flujo simple con petróleo puede proporcionar la monitorización adecuada. También es posible, en principio, extender la calibración de flujo a partir de un líquido, por ejemplo, agua a petróleo. La figura 8 muestra la diferencia en los picos de resonancia para el petróleo y el agua, y el líquido puede identificarse fácilmente a partir de las características de resonancia de un solo pico. Una vez que se realiza la calibración de flujo con el petróleo y a continuación con agua, es posible corregir el flujo cuando el fluido que fluye es una combinación de cualquiera de los dos debido a que los resultados medidos estarán entre los de cualquiera de los líquidos. Esto es posible porque la composición se monitoriza midiendo la separación de pico o una FFT de los datos de resonancia, mientras que el flujo se mide mediante el seguimiento de la posición de un único pico de resonancia. Estas dos mediciones son independientes una de otra.

La descripción anterior de la invención se ha presentado con fines de ilustración y descripción y no pretende ser exhaustiva o limitar la invención a la forma precisa desvelada, y obviamente son posibles muchas modificaciones y variaciones a la luz de las enseñanzas anteriores. Las realizaciones se eligieron y describieron con el fin de explicar mejor los principios de la invención y su aplicación práctica para permitir de este modo que otros expertos en la materia utilicen mejor la invención en diversas realizaciones y con diversas modificaciones que sean adecuadas al uso específico contemplado. Se pretende que el alcance de la invención esté definido por las reivindicaciones adjuntas a la misma.

REFERENCIAS

1. La patente de Estados Unidos N.º 5.767.407 de "Noninvasive Identification Of Fluids By Swept-Frequency Acoustic Interferometry", que se publicó para Dipen N. Sinha el 16 de junio de 1998.
2. F. Eggers y Th. Funck, "Ultrasonic relaxation spectroscopy in liquids", *Naturwissenschaften* 63, 280 (1976).
3. Dipen N. Sinha y Greg Kaduchak, "Noninvasive Determination of Sound Speed and Attenuation in Liquids", *Experimental Methods in the Physical Sciences*, Volumen 39, Academic Press (Septiembre 2001).
4. Patente de Estados Unidos N.º 5.606.130 de "Method For Determining The Octane Rating Of Gasoline"

Samples By Observing Corresponding Acoustic Resonances Therein” que se publicó para Dipen N. Sinha y Brian W. Anthony el 25 de febrero de 1997

5. U La patente de Estados Unidos N.º 5.886.262 de “Apparatus And Method For Comparing Corresponding Acoustic Resonances in Liquids” que se publicó para Dipen N. Sinha el 23 de marzo de 1999.

5 6. Zhijing Wang y Amos Nur, J. Acoust. Soc. Am. 89, 2725 (1991).

7. Z. Wang y A. Nur, Geophysics 55, 723 (1990).

REIVINDICACIONES

1. Un método para monitorizar la composición de un fluido (14) que fluye a través de un recipiente (12) a un caudal que comprende las etapas de:

- 5 a) aplicar una señal acústica periódica continua en el exterior del recipiente de tal manera que la señal acústica se transfiera al fluido que fluye, generando de este modo unas características de resonancia de vibración;
- b) detectar las características de vibración generadas en el líquido que fluye;
- 10 c) barrer la señal acústica periódica continua a través de un intervalo de frecuencias elegido que incluye una parte de una característica de resonancia de vibración;
- d) medir la fase de la característica de resonancia de vibración en relación con la de la señal acústica periódica continua que genera de este modo una diferencia de fase;
- e) determinar el caudal del fluido; y
- 15 f) corregir la diferencia de fase para el caudal del fluido, por lo que se identifican los cambios en la composición del fluido.

2. Un aparato para monitorizar la composición de un fluido que fluye a través de un recipiente a un caudal que comprende en combinación:

- 20 a) un primer transductor (10a) en contacto acústico con la superficie exterior de dicho recipiente (12) para aplicar una señal acústica periódica continua en el exterior de dicho recipiente (12) de tal manera que la señal acústica se transfiera a dicho fluido (14) que fluye, generando de este modo unas características de resonancia de vibración que tienen una pluralidad de máximos y mínimos en su interior, y para detectar el patrón de vibración generado;
- 25 b) un generador de barrido (28) para barrer dicho primer transductor (10a) a través de un intervalo de frecuencias elegido que incluye una parte de una característica de resonancia de vibración;
- c) medios para medir la fase de la característica de resonancia de vibración en relación con la de la señal acústica periódica continua que genera de este modo una diferencia de fase;
- d) un medidor de flujo para determinar el caudal del fluido (14); y
- 30 e) un procesador de datos (38) para registrar la diferencia de fase y corregir la diferencia de fase del caudal del fluido, en el que se identifican los cambios en la composición del fluido.

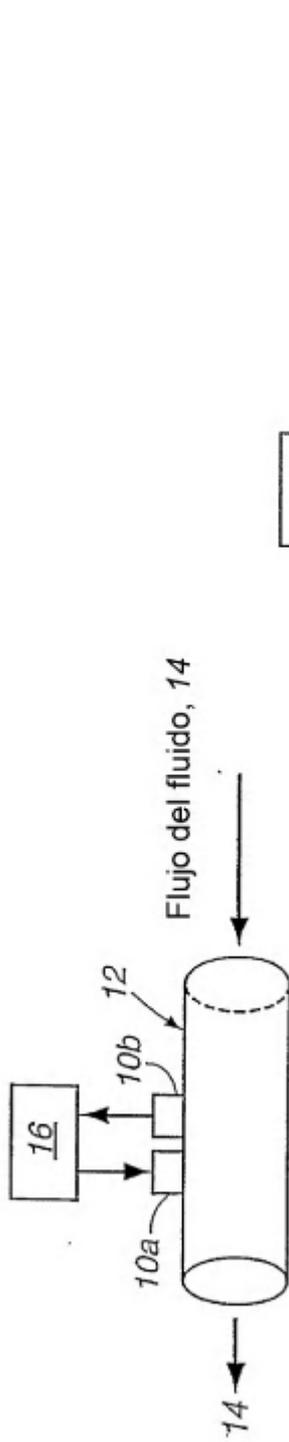


Fig. 1a

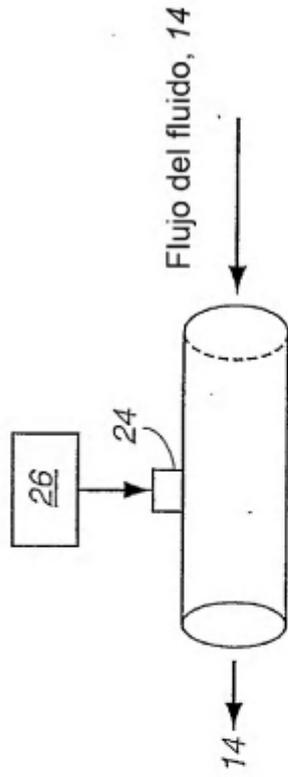


Fig. 1c

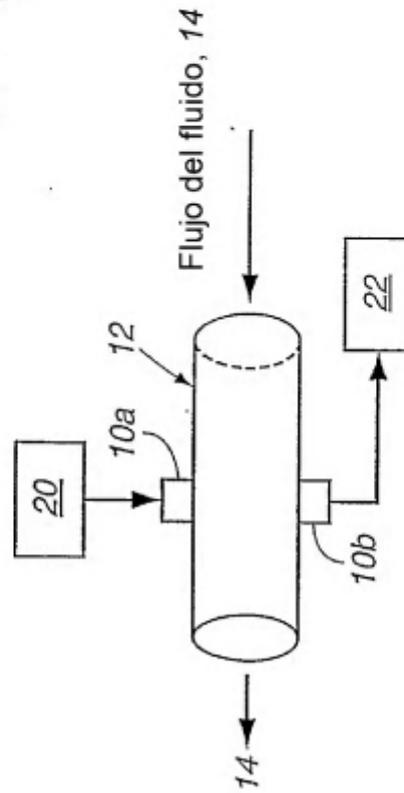


Fig. 1b

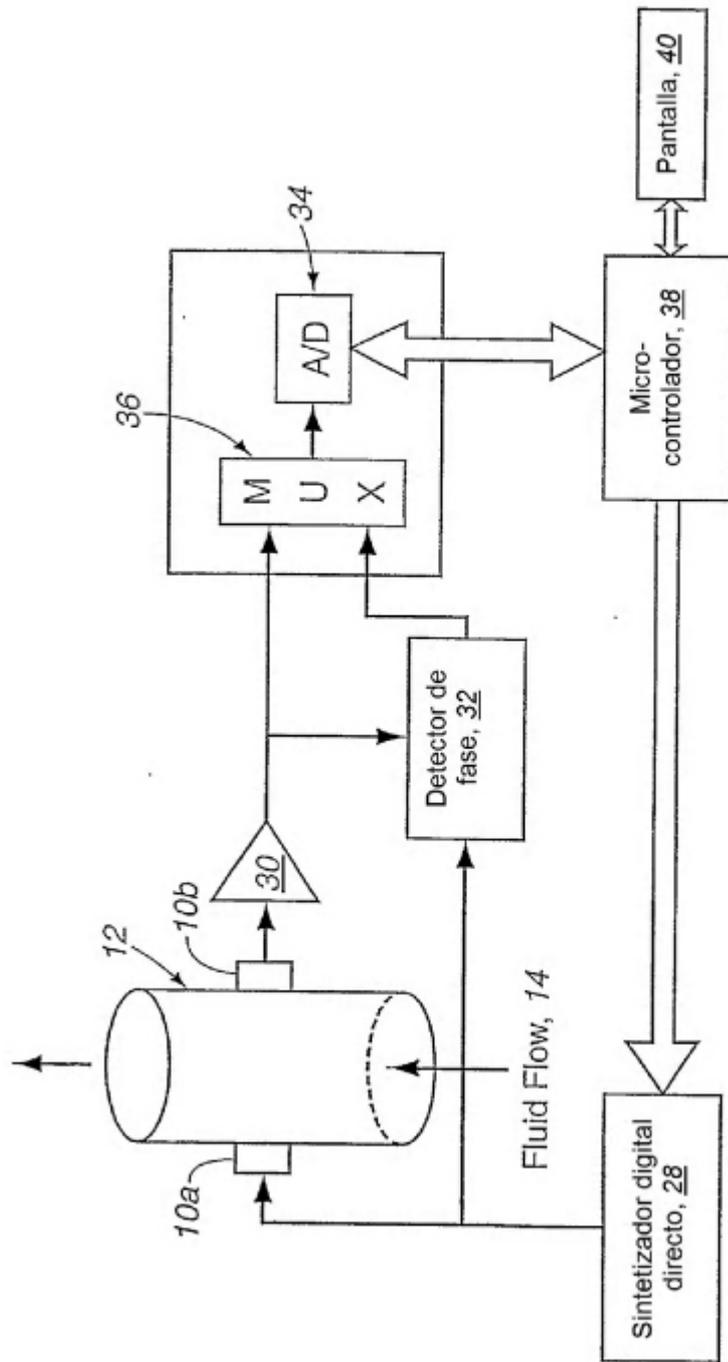


Fig. 2

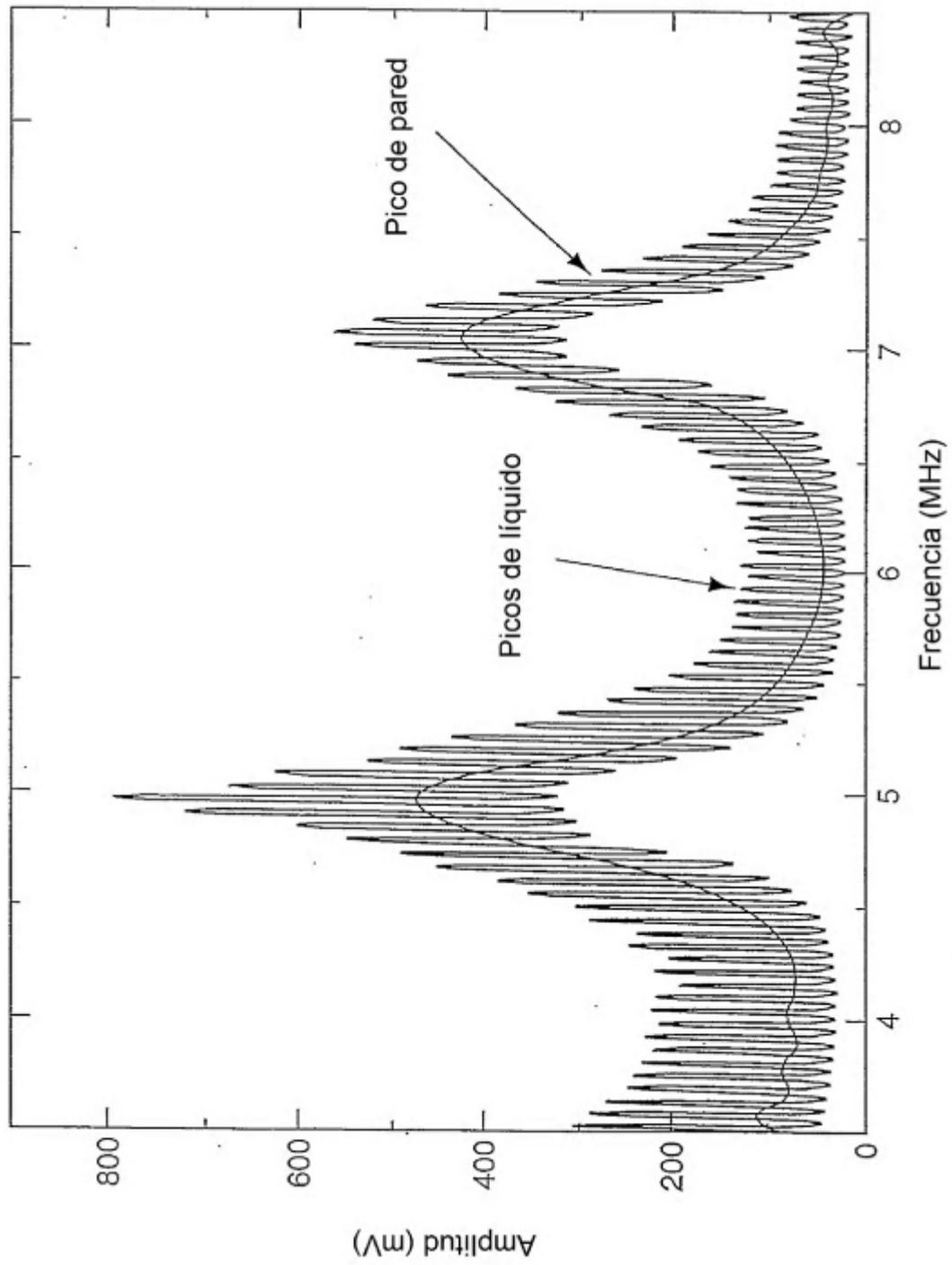


Fig. 3

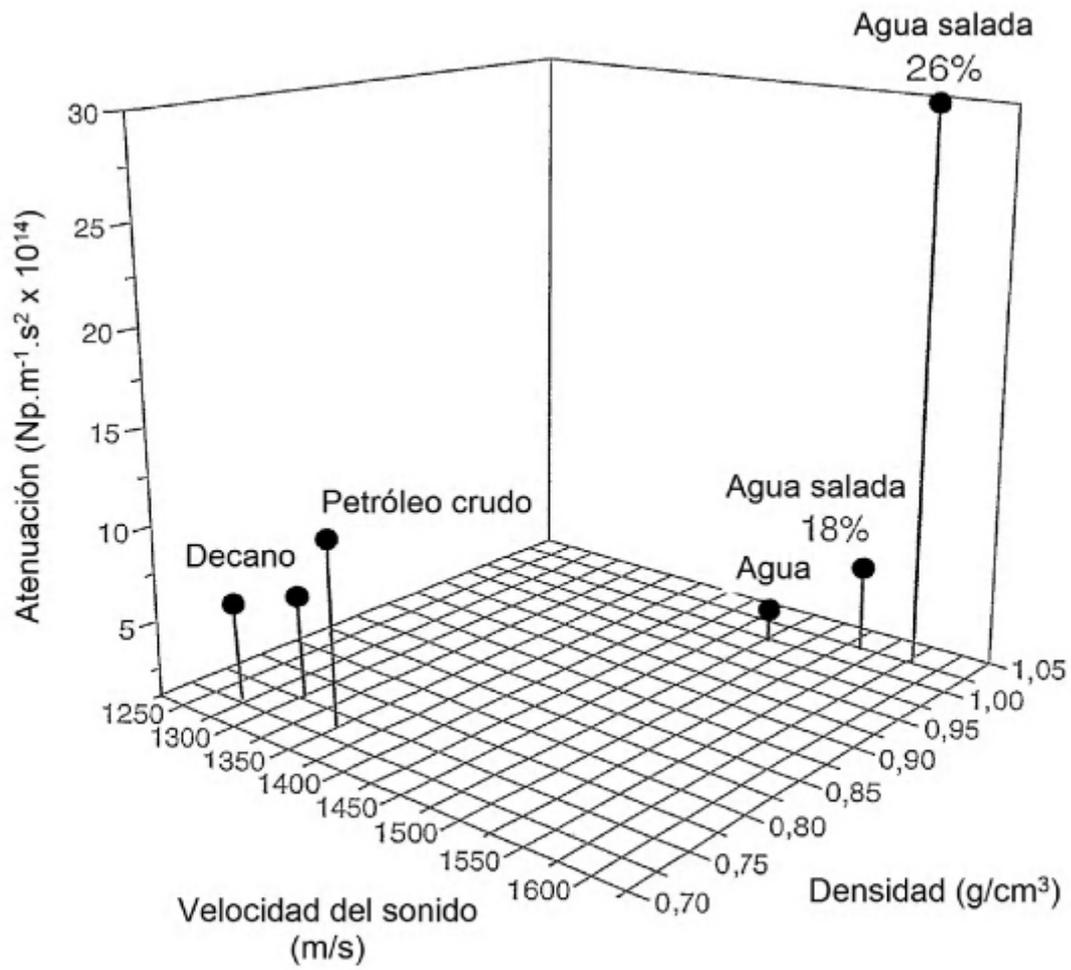


Fig. 4

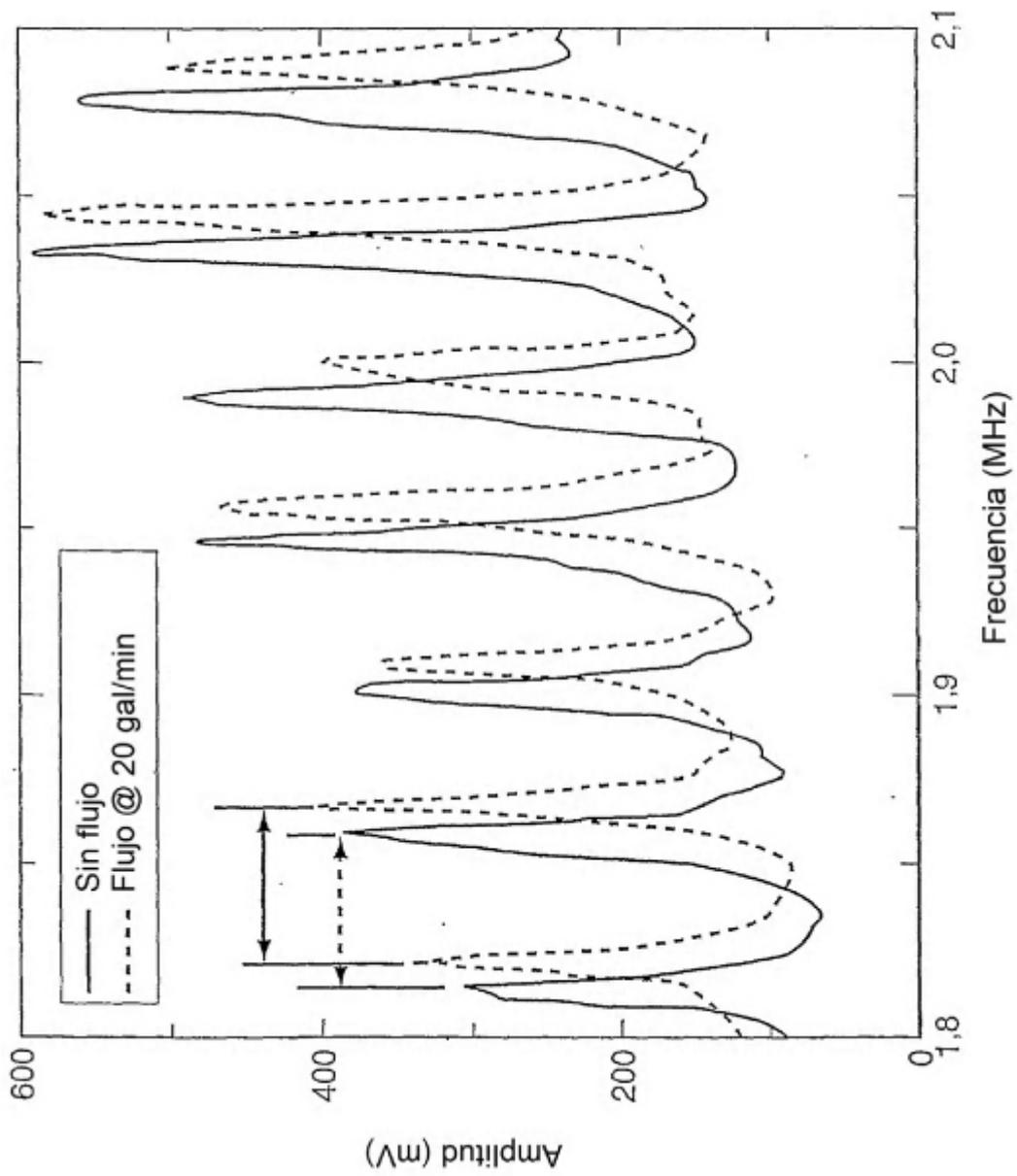


Fig. 5

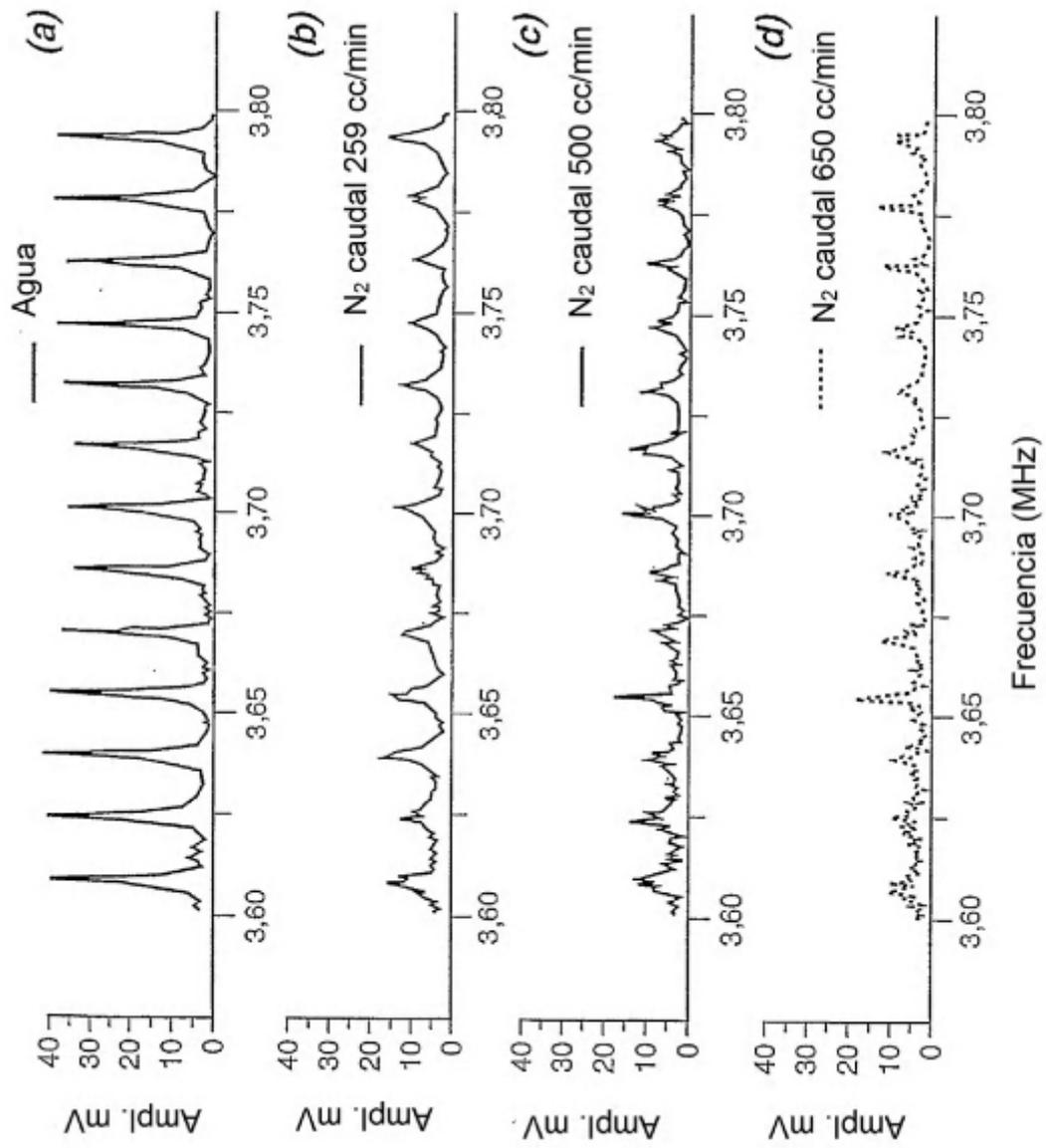


Fig. 6

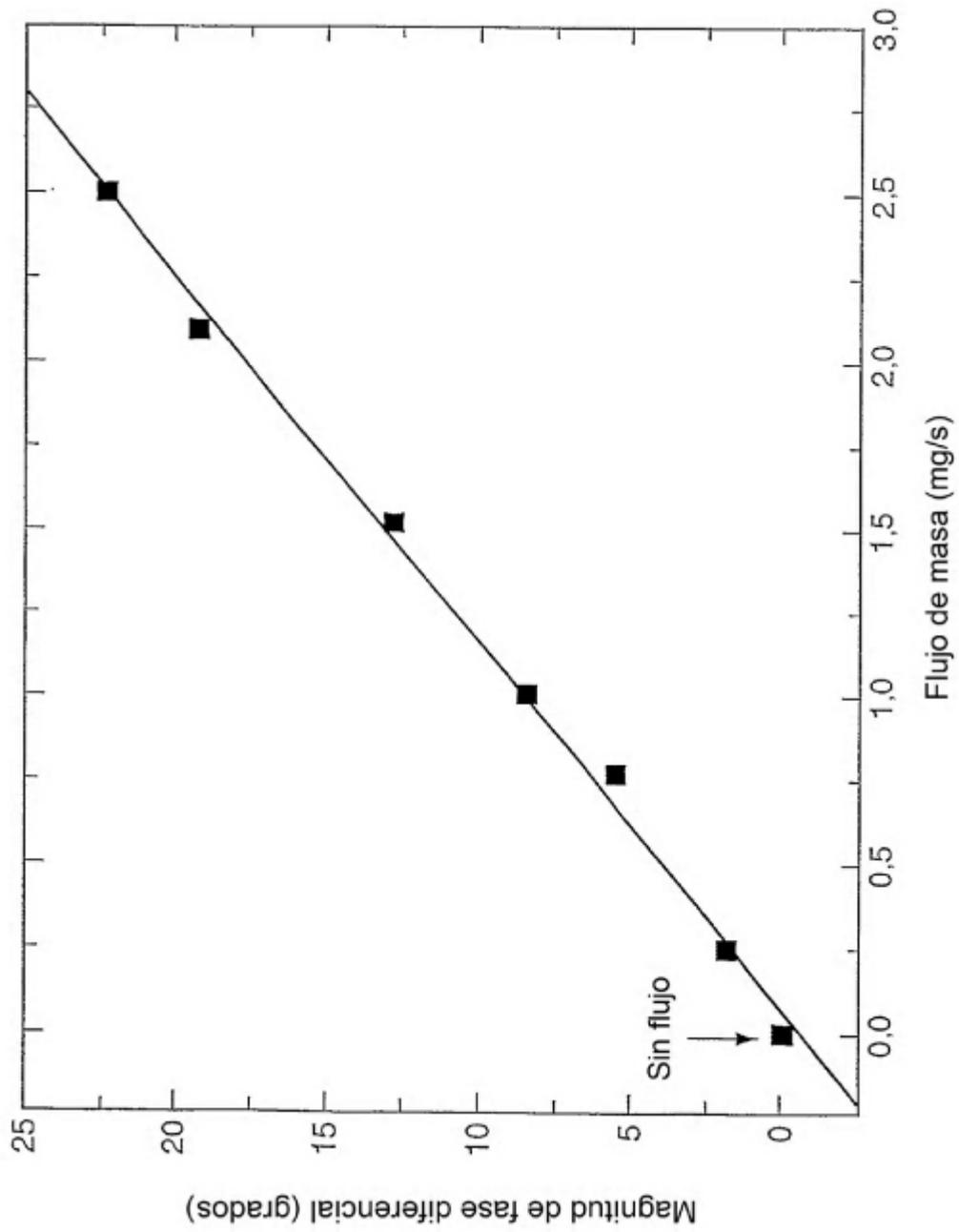


Fig. 7

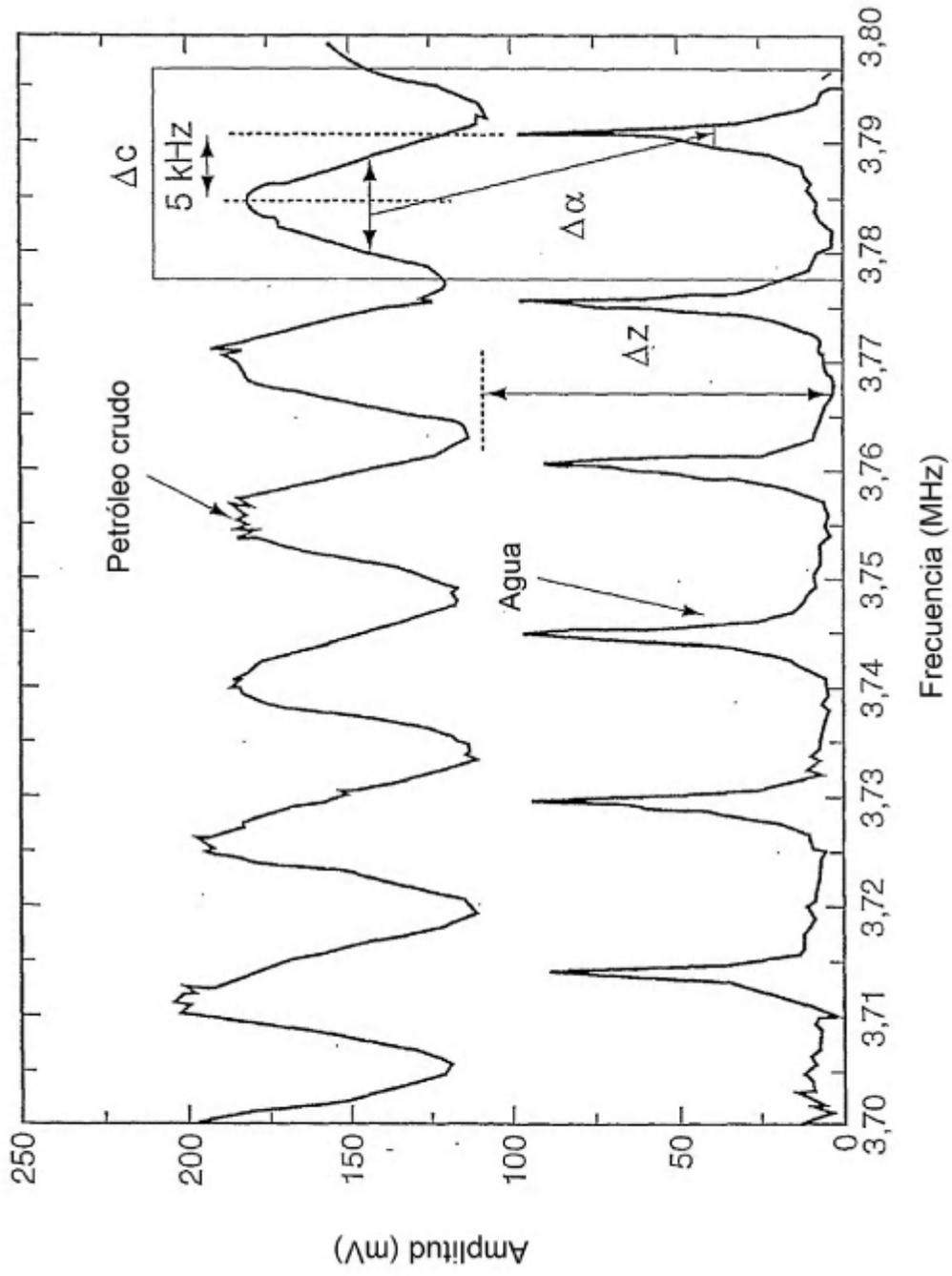


Fig. 8