

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 805 323**

51 Int. Cl.:

**B01D 17/04** (2006.01)

**C02F 1/36** (2006.01)

**C02F 1/40** (2006.01)

**B01D 43/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.03.2013 PCT/US2013/032705**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.09.2013 WO13138797**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.03.2013 E 13760840 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.05.2020 EP 2825279**

54 Título: **Plataforma de tecnología de separación acustofórfica de múltiples componentes**

30 Prioridad:

**15.03.2012 US 201261611159 P**

**15.03.2012 US 201261611240 P**

**21.01.2013 US 201361754792 P**

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

**11.02.2021**

73 Titular/es:

**FLODESIGN SONICS INC. (100.0%)**

**380 Main Street**

**Wilbraham, MA 01095, US**

72 Inventor/es:

**LIPKENS, BART;**

**DIONNE, JASON;**

**KENNEDY, III, THOMAS J.;**

**MASI, LOUIS y**

**KOWALSKI, III, STANLEY**

74 Agente/Representante:

**DURAN-CORRETJER, S.L.P**

ES 2 805 323 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

Plataforma de tecnología de separación acustoforética de múltiples componentes

### 5 ESTADO DE LA TÉCNICA ANTERIOR

La presente solicitud se refiere a la tecnología de separación acustoforética.

10 La acustoforesis es la separación de partículas usando ondas sonoras de alta intensidad. Hace tiempo que se sabe que las ondas de sonido estacionarias de alta intensidad pueden ejercer fuerzas sobre las partículas. Una onda estacionaria tiene un perfil de presión que parece “detenerse” en el tiempo. El perfil de presión en una onda estacionaria varía de áreas de alta presión (nodos) a áreas de baja presión (antinodos). Las ondas estacionarias se producen en resonadores acústicos. Los ejemplos comunes de resonadores acústicos incluyen muchos instrumentos musicales de viento, tales como tubos de órgano, flautas, clarinetes y trompetas.

15 Se necesitan tecnologías de separación eficientes para corrientes de líquido de múltiples componentes que eliminen cualquier desecho y reduzcan la energía requerida, fomentando de ese modo un entorno sostenible.

### 20 BREVE DESCRIPCIÓN

La presente invención se refiere a sistemas y dispositivos para la acustoforesis a gran escala. Los dispositivos usan un transductor ultrasónico, tal como se describe en el presente documento. El transductor es accionado a frecuencias que producen múltiples ondas estacionarias.

25 En algunas realizaciones, se da a conocer un aparato que incluye una cámara de flujo con una entrada y una salida a través de las cuales se hace fluir una mezcla de un fluido huésped y, como mínimo, uno de un segundo fluido y un material en partículas. Un transductor ultrasónico incorporado en una pared de dicha cámara de flujo o ubicado fuera de la pared de la cámara de flujo es accionado por una señal de tensión oscilante, periódica o de impulsos, de frecuencias ultrasónicas que acciona el transductor en un modo de vibración de orden superior para crear ondas estacionarias en el canal de flujo. El transductor incluye un cristal cerámico. Un reflector está situado en la pared en el lado opuesto de la cámara de flujo respecto al transductor.

35 En otras realizaciones, se da a conocer un procedimiento de separación de un fluido huésped de, como mínimo, uno de un segundo fluido y un material en partículas. El procedimiento comprende hacer fluir el fluido huésped a una cámara de flujo que tiene un resonador y una bolsa de recogida y accionar un transductor con una señal de tensión oscilante, periódica o de impulsos para crear ondas estacionarias en el resonador y recoger el, como mínimo, uno del segundo fluido y material en partículas en la bolsa de recogida.

40 En otras realizaciones más, un aparato comprende una cámara de flujo con una entrada y una salida a través de las cuales se hace fluir una mezcla de un fluido huésped y, como mínimo, uno de un segundo fluido y un material en partículas. Una serie de transductores ultrasónicos están incorporados en una pared de dicha cámara de flujo o ubicados fuera de la pared de la cámara de flujo. Cada uno de los transductores incluye un cristal cerámico accionado por una señal de tensión oscilante, periódica o de impulsos, de frecuencias ultrasónicas que acciona los transductores en un modo de vibración de orden superior para crear ondas estacionarias en el canal de flujo. Un reflector está ubicado sobre la pared en el lado opuesto de la cámara de flujo respecto a los transductores.

Estas y otras características no limitativas se describen más concretamente a continuación.

### 50 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Sigue una breve descripción de los dibujos, que se presentan con el propósito de ilustrar las realizaciones a modo de ejemplo dadas a conocer en el presente documento y no con el propósito de limitar las mismas.

La **figura 1** muestra un separador acustoforético que tiene un transductor.  
 55 La **figura 2** es un diagrama que ilustra la función de un separador acustoforético.  
 La **figura 3** muestra un separador acustoforético que tiene una serie de transductores.  
 La **figura 3A** es una vista en detalle de un difusor usado como entrada en el separador de la **figura 3**.  
 La **figura 4B** es una vista en detalle de un difusor de entrada alternativo que puede ser usado con el separador de la **figura 3**.  
 60 La **figura 5** es un diagrama, en sección transversal, de un transductor ultrasónico convencional.  
 La **figura 6** es una imagen de una placa de desgaste de un transductor convencional.  
 La **figura 7** es un diagrama, en sección transversal, de un transductor ultrasónico de la presente invención. Dentro del transductor hay una separación de aire, y no hay ninguna capa de apoyo.  
 La **figura 8** es un modelo informático de un separador acustoforético simulado para generar las **figuras 9 a 17**.  
 65 Las **figuras 9 a 17** son simulaciones de las fuerzas sobre una partícula en un separador acustoforético.

La **figura 18** es una foto de un transductor cuadrado y de un transductor circular para su uso en un separador acustoforético.

La **figura 19** es un gráfico de amplitud de impedancia con frente a frecuencia cuando un transductor cuadrado es accionado a diferentes frecuencias.

5 La **figura 20** ilustra las configuraciones de nodo para siete de las amplitudes máximas de la **figura 19**.

La **figura 21** es una foto de la configuración de nueve nodos de un transductor.

La **figura 22** es una foto de otra configuración de múltiples nodos de un transductor.

La **figura 23** es una simulación por ordenador de las fuerzas de un transductor.

Las **figuras 24 y 25** muestran configuraciones de disposiciones de transductores.

10 La **figura 26** muestra un separador acustoforético para separar materiales flotantes para su uso con los transductores de las **figuras 21 y 22**.

La **figura 27** es una simulación por ordenador de las fuerzas de una disposición de transductores.

La **figura 28** es una foto que muestra los nodos de una disposición de transductores.

La **figura 29** es una foto que muestra los nodos de una disposición de transductores.

15 La **figura 30** es una simulación por ordenador de las fuerzas de una disposición de transductores.

### **DESCRIPCIÓN DETALLADA**

20 La presente invención se puede comprender más fácilmente haciendo referencia a la siguiente descripción detallada de realizaciones deseadas y a los ejemplos incluidos en la misma. En la siguiente memoria descriptiva y en las reivindicaciones que siguen, se hará referencia a una serie de términos que se definirán para tener los siguientes significados.

25 Las formas singulares “un”, “una” y “el”, “la” incluyen referentes plurales a menos que el contexto claramente indique lo contrario.

Tal como se usa en la memoria descriptiva y en las reivindicaciones, la expresión “que comprenden” puede incluir las realizaciones “que consisten en” y “que consisten esencialmente en”.

30 Debe comprenderse que los valores numéricos incluyen valores numéricos que son iguales cuando se reducen al mismo número de cifras significativas y valores numéricos que difieren del valor indicado en menos que el error experimental de la técnica de medición convencional del tipo descrito en la presente solicitud para determinar el valor.

35 Todos los intervalos dados a conocer en el presente documento incluyen el punto extremo mencionado y pueden combinarse independientemente (por ejemplo, el intervalo “desde 2 gramos hasta 10 gramos” incluye los puntos extremos, 2 gramos y 10 gramos, y todos los valores intermedios). Los puntos extremos de los intervalos y cualesquiera valores dados a conocer en el presente documento no están limitados al intervalo o valores precisos; son lo suficientemente imprecisos como para incluir valores que se aproximan a estos intervalos y/o valores.

40 Tal como se usa en el presente documento, se puede aplicar lenguaje de aproximación para modificar cualquier representación cuantitativa que pueda variar sin dar lugar a un cambio en la función básica con la que esta está relacionada. En consecuencia, un valor modificado por un término o términos, tales como “aproximadamente” y “sustancialmente”, puede no limitarse al valor preciso especificado, en algunos casos. En por lo menos algunos casos, el lenguaje de aproximación puede corresponder a la precisión de un instrumento para medir el valor. El modificador “aproximadamente” debe considerarse asimismo como que da a conocer el intervalo definido por los valores absolutos de los dos puntos extremos. Por ejemplo, la expresión “desde aproximadamente 2 hasta aproximadamente 4” también da a conocer el intervalo “desde 2 hasta 4”.

50 Se necesitan tecnologías de separación eficientes para corrientes de líquido de múltiples componentes que eliminen cualquier desecho y reduzcan la energía requerida y, por tanto, fomenten un entorno sostenible. La tecnología de separadores de fases acustoforéticos de elevado caudal volumétrico que usa ondas estacionarias ultrasónicas proporciona el beneficio de no tener consumibles, no generar desechos y un bajo coste de energía. La tecnología es eficiente en la eliminación de partículas de tamaños altamente variables, incluyendo la separación de partículas de tamaños de micras y submicras. Pueden encontrarse ejemplos de filtros/colectores acústicos que utilizan acustoforesis en las solicitudes de Patente U.S. en de propiedad en común US2011278218, US2012325727 y US2012328477.

60 La tecnología de plataforma descrita en el presente documento proporciona una solución innovadora que incluye un separador de fases acustoforético de elevado caudal basado en ondas estacionarias ultrasónicas con el beneficio de no tener consumibles, no generar desechos y un bajo coste de energía. La acustoforesis es un enfoque de estado sólido de baja potencia, sin caída de presión, sin obstrucciones, para la eliminación de partículas de las dispersiones de fluido: es decir, se usa para conseguir separaciones que se realizan más habitualmente con filtros porosos, pero no tiene ninguno de los inconvenientes de los filtros. En concreto, la presente invención da a conocer sistemas que operan a gran escala para separaciones en sistemas de flujo con altos caudales. El resonador acústico está diseñado para crear una onda estacionaria ultrasónica tridimensional de alta intensidad que da lugar a una fuerza de

radiación acústica que es mayor que los efectos combinados del arrastre del fluido y la flotabilidad y, por tanto, puede capturar, es decir, mantener estacionaria, la fase suspendida. Los sistemas actuales tienen la capacidad de crear campos de ondas ultrasónicas estacionarias que pueden capturar partículas en campos de flujo con una velocidad lineal superior a 1 cm/s. Esta tecnología ofrece una alternativa ecológica y sostenible para la separación de fases secundarias con una reducción significativa en coste de energía. Se han demostrado excelentes eficiencias de separación de partículas para tamaños de partículas tan pequeñas como una micra.

La tecnología de separación acustoforética emplea ondas estacionarias ultrasónicas para capturar, es decir, mantener estacionarias partículas de fase secundaria en una corriente de fluido huésped. Esta es una distinción importante respecto a los enfoques anteriores en los que las trayectorias de las partículas son simplemente alteradas por el efecto de la fuerza de radiación acústica. La dispersión del campo acústico de las partículas da lugar a una fuerza de radiación acústica tridimensional, que actúa como un campo de captura tridimensional. La fuerza de radiación acústica es proporcional al volumen de las partículas (por ejemplo, el cubo del radio). Es proporcional a la frecuencia y al factor de contraste acústico. También escala con la energía acústica (por ejemplo, el cuadrado de la amplitud de la presión acústica). La variación espacial sinusoidal de la fuerza es lo que conduce a las partículas a las posiciones estables de las ondas estacionarias. Cuando la fuerza de radiación acústica ejercida sobre las partículas es más fuerte que el efecto combinado de la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de flotabilidad/gravitacional, la partícula queda atrapada dentro del campo de ondas estacionarias acústicas. La acción de las fuerzas acústicas sobre las partículas capturadas da lugar a la concentración, aglomeración y/o coalescencia de partículas y gotitas. Las partículas más pesadas que el agua (es decir, más densas que el agua) se separan debido a la decantación gravitacional mejorada y las partículas más ligeras que el agua se separan debido a la flotabilidad mejorada.

Los procesos de separación de partículas eficientes y económicos pueden ser útiles en muchas áreas de generación de energía, por ejemplo, producción de agua, fracturación hidráulica, y biocombustibles, por ejemplo, extracción y deshidratación. La tecnología acustoforética se puede usar para abordar la captura acelerada de esporas bacterianas en el agua, la recuperación de aceite y la deshidratación de biocombustibles obtenidos a partir de microalgas. La tecnología actual usada en el campo de la recuperación de aceite no tiene un buen rendimiento en la recuperación de gotitas de aceite pequeñas, es decir, de menos de 20 micras. No obstante, los sistemas de acustoforesis descritos en el presente documento pueden mejorar la captura y la coalescencia de pequeñas gotitas de aceite, cambiando así la distribución del tamaño de las partículas dando lugar a un aumento global de la captura de aceite. Para ser útil, en general, es necesario demostrar grandes caudales a un nivel de 15 litros por minuto (4 galones por minuto (GPM), la conversión de 1 GPM = 3,7854 litros por minuto se aplica en toda la descripción). Otro objetivo es la mayor captura de las gotitas de aceite con un diámetro de menos de 20 micras.

La separación acustoforética también puede ser usada para ayudar a aplicaciones tales como la tecnología avanzada de biorrefinación para convertir la biomasa no alimentaria de bajo coste fácilmente disponible (por ejemplo, desechos sólidos municipales y lodos de depuradora) en una amplia variedad de productos químicos y alcoholes secundarios que pueden ser refinados, a continuación, en gasolina, combustible para aviones o diésel renovables. Se usa una tecnología de tratamiento de aguas para deshidratar el caldo de fermentación y aislar sales orgánicas valiosas para su procesamiento adicional en combustibles. El proceso de deshidratación se realiza actualmente a través de un procedimiento de ultrafiltración costoso e ineficiente que sufre la obstrucción frecuente de las membranas, un factor de concentración relativamente bajo y un elevado gasto de capital y de funcionamiento. La separación acustoforética puede filtrar las partículas con una distribución de tamaño de partículas entrantes que abarca más de tres órdenes de magnitud, a saber, de 600 micras a 0,3 micras, permitiendo mejoras en la concentración del caldo separado con un menor gasto de capital y de funcionamiento.

La separación acustoforética también es útil para la extracción, recuperación de aceites y deshidratación de microalgas para su conversión en biocombustible. Las actuales tecnologías de extracción, recuperación de aceites y deshidratación para microalgas sufren de elevados gastos de capital y de funcionamiento. Las mejores estimaciones actuales ponen el precio del barril de biocombustible obtenido de microalgas en un mínimo de 200,00 \$ por barril. Existe la necesidad en la técnica de biocombustibles de microalgas de tecnologías que mejoren las etapas de extracción, recuperación de aceites y deshidratación de este proceso. La tecnología de separación acustoforética satisface estas necesidades.

Algunas otras aplicaciones están en las áreas de tratamiento de aguas residuales, reciclaje de aguas grises y producción de agua. Otras aplicaciones están en el área de las ciencias de la vida y las aplicaciones médicas, tal como la separación de lípidos respecto de glóbulos rojos. Esto puede ser de importancia crítica durante la cirugía de baipás cardiopulmonar, que consiste en aspirar la sangre derramada del mediastino. Los lípidos se introducen involuntariamente en el torrente sanguíneo cuando la sangre se transfunde nuevamente al cuerpo. Las microembolias lipídicas pueden viajar al cerebro y causar diversos trastornos neurocognitivos. Por lo tanto, existe la necesidad de limpiar la sangre. Los procedimientos existentes son actualmente ineficientes o perjudiciales para los glóbulos rojos.

Las realizaciones particulares se centran en la captura y el crecimiento de gotitas de aceite inferiores a las 20 micras. Se captura por lo menos el 80 % del volumen de las gotitas de menos de 20 micras y a continuación se

hacen crecer a gotitas de más de 20 micras. El proceso implica la captura de las gotitas de aceite en la onda acústica estacionaria, la coalescencia de muchas gotitas pequeñas atrapadas y, finalmente, la liberación de las gotitas más grandes cuando la fuerza de captura acústica se vuelve más pequeña que la fuerza de flotabilidad.

- 5 Se han combinado modelos informáticos avanzados de física múltiple y de escala de longitud múltiple y controladores ultrasónicos de alta frecuencia (MHz), alta potencia y alta eficiencia con controles integrados, para llegar a nuevos diseños de resonadores acústicos accionados por disposiciones de transductores piezoeléctricos, lo que da lugar a dispositivos de separación acustoforética que superan con creces las capacidades actuales.
- 10 Deseablemente, tales transductores proporcionan una fuerza transversal para acompañar la fuerza axial a fin de aumentar las capacidades de captura de partículas de un sistema acustoforético.

15 En la **figura 1** se muestra una representación esquemática de una realización de un separador de partículas acustoforético 1. Una corriente de líquido de múltiples componentes (por ejemplo, agua u otro fluido) se introduce en la entrada 4 y el fluido separado sale por el extremo opuesto a través de la salida 6. Cabe señalar que esta corriente de líquido, en general, está bajo presión cuando fluye a través del separador. El separador de partículas 1 tiene un canal de flujo longitudinal 8 que transporta la corriente de líquido de múltiples componentes y pasa a través de un resonador 10. El resonador 10 incluye un transductor 12 o, en algunas realizaciones, una disposición de transductores, que actúa como una fuente de excitación de ondas acústicas. El resonador acústico 10 tiene un reflector 14, que está ubicado en la pared opuesta al transductor 12. Una bolsa de recogida 16 recoge impurezas, y también está ubicada opuesta al transductor. Tal como se define en el presente documento, las impurezas incluyen partículas o fluidos distintos del fluido huésped. El resonador acústico 10 está diseñado para mantener una onda acústica estacionaria tridimensional de alta intensidad. El sistema es accionado por un generador de funciones y un amplificador (no mostrado). El rendimiento del sistema es monitorizado y controlado por un ordenador.

20 La **figura 2** muestra una representación esquemática de una realización para eliminar aceite u otro material más ligero que el agua. El transductor 20 aplica frecuencias de excitación habitualmente en el intervalo de cientos de kHz a varios MHz. Las microgotas 22 son capturadas en las ondas estacionarias 24, se aglomeran y, en el caso de material flotante, flotan a la superficie y se descargan a través de una salida de efluente 26. El agua purificada se descarga en la salida 28. La tecnología de separación acustoforética puede lograr la separación de partículas de múltiples componentes sin obstrucciones a un coste muy reducido.

25 La **figura 3** muestra otra realización de un separador de partículas acustoforéticas 30. Al igual que el separador acustoforético 1, el separador acustoforético 30 tiene una entrada 32 y una salida 34. La entrada 32 está equipada con una boquilla o difusor 90 que tiene un panel 95 para facilitar el desarrollo del flujo de pistón. El separador acustoforético 30 tiene una disposición 38 de transductores 40, en este caso seis transductores todos dispuestos en la misma pared. Los transductores están dispuestos de modo que cubren toda la sección transversal de la ruta del flujo. El sistema de separación acustoforética de la **figura 3** tiene, en ciertas realizaciones, una sección transversal cuadrada de 15,24 cm x 15,24 cm (6 pulgadas x 6 pulgadas, la conversión de 1 pulgada (1") = 2,54 cm se aplica a toda la descripción) que funciona a caudales de hasta 11 litros por minuto (3 galones por minuto (GPM)), o a una velocidad lineal de 8 mm/s. Los transductores 40 son seis transductores de PZT-8 (titanato de circonato de plomo) de 2,54 cm (1 pulgada) de diámetro y una frecuencia de resonancia nominal de 2 MHz. Cada transductor consume aproximadamente 28 W de potencia para capturar gotitas a un caudal de 11 litros por minuto (3 GPM). Esto se traduce en un coste de energía de 0,25 kWh/m<sup>3</sup>. Esto es una indicación del muy bajo coste de energía de esta tecnología. Deseablemente, cada transductor es alimentado y controlado por su propio amplificador.

35 La **figura 4A** y la **figura 4B** muestran dos difusores diferentes que se pueden usar en la entrada del separador acustoforético. El difusor 90 tiene una entrada 92 (en este caso con forma circular) y una salida 94 (en este caso con forma cuadrada). El difusor de la **figura 4A** se ilustra en la **figura 3**. La **figura 4A** incluye una rejilla o panel 95, mientras que la **figura 4B** no. La rejilla ayuda a garantizar un flujo uniforme.

40 La **figura 5** es un diagrama, en sección transversal, de un transductor ultrasónico convencional. Este transductor tiene una placa de desgaste 50 en un extremo inferior, una capa epoxi 52, un cristal cerámico 54 (fabricado de PZT, por ejemplo), una capa epoxi 56 y una capa de apoyo 58. La capa epoxi 56 une la capa de apoyo 58 al cristal 54. Todo el conjunto está contenido en un cuerpo envolvente 60 que puede estar fabricado de aluminio, por ejemplo. Un conector 62 proporciona una conexión para que los cables pasen a través del cuerpo envolvente y se conecten a los cables (no mostrados) que se unen al cristal 54.

45 La **figura 6** es una foto de una placa de desgaste 50 con una burbuja 64 donde la placa de desgaste se ha separado de la superficie del cristal cerámico debido a la presión oscilante.

50 La **figura 7** es una vista, en sección transversal, de un transductor ultrasónico 81 de la presente invención, que puede usarse con los separadores acustoforéticos de la **figura 1** y la **figura 3**. El transductor 81 tiene un cuerpo envolvente de aluminio 82. Un cristal de PZT 86 define el extremo inferior del transductor y queda al descubierto del exterior del cuerpo envolvente. El cristal está soportado en su perímetro por el cuerpo envolvente.

Los tornillos (no mostrados) fijan una placa superior de aluminio 82a del cuerpo envolvente al cuerpo 82b del cuerpo envolvente por medio de las roscas 88. La placa superior incluye un conector 84 para pasar energía al cristal de PZT 86. Se suministra energía eléctrica al cristal de PZT 86 por el cable eléctrico 90. Cabe señalar que el cristal 86 no tiene una capa de apoyo como ocurre en la **figura 5**. Dicho de otro modo, hay una separación de aire 87 en el transductor entre la placa superior de aluminio 82a y el cristal 86. Se puede proporcionar un apoyo mínimo en algunas realizaciones.

El diseño del transductor puede afectar al rendimiento del sistema. Un transductor habitual es una estructura en capas con el cristal cerámico unido a una capa de apoyo y a una placa de desgaste. Debido a que el transductor está cargado con la alta impedancia mecánica presentada por la onda estacionaria, las pautas de diseño tradicionales para placas de desgaste, por ejemplo, de un grosor de media o un cuarto de longitud de onda, y los procedimientos de fabricación pueden no ser apropiados. Por el contrario, en una realización de la presente invención de los transductores, no hay placa de desgaste o apoyo, lo que permite que el cristal vibre con un alto factor Q. El cristal/disco cerámico vibratorio queda expuesto directamente al fluido que fluye a través de la cámara de flujo.

La eliminación del apoyo (por ejemplo, haciendo que el cristal esté respaldado por aire) también permite que el cristal cerámico obtenga modos de vibración de orden superior (por ejemplo, desplazamiento modal de orden superior). En un transductor que tiene un cristal con apoyo, el cristal vibra con un desplazamiento uniforme, como un pistón. Quitar el apoyo permite que el cristal vibre en un modo de desplazamiento no uniforme. Cuanto más alto sea el orden de la forma de modo del cristal, más líneas nodales tiene el cristal. El desplazamiento modal de orden superior del cristal crea más líneas de captura, aunque la correlación de la línea de captura con el nodo no es necesariamente uno a uno, y accionar el cristal a una frecuencia más alta no necesariamente producirá más líneas de captura. Véase el análisis a continuación con respecto a las figuras 19 a 22.

En algunas realizaciones, el cristal puede tener un apoyo que afecta mínimamente al factor Q del cristal (por ejemplo, menos del 5 %). El apoyo puede estar fabricado de un material sustancialmente acústicamente transparente, como madera de balsa o corcho, lo que permite que el cristal vibre en una forma de modo de orden superior y mantiene un alto factor Q mientras que sigue proporcionando un cierto soporte mecánico para el cristal. En otra realización, el apoyo puede ser un entramado que sigue los nodos del cristal vibratorio en un modo de vibración de orden superior particular, proporcionando soporte en las ubicaciones de los nodos mientras permite que el resto del cristal vibre libremente. El objetivo del entramado o del material acústicamente transparente es proporcionar soporte sin reducir el factor Q del cristal.

Colocar el cristal en contacto directo con el fluido también contribuye al alto factor Q al evitar los efectos de amortiguación y absorción de energía de la placa de desgaste. Otras realizaciones pueden tener placas de desgaste o una superficie de desgaste para evitar que el PZT, que contiene plomo, entre en contacto con el fluido huésped. Esto puede ser deseable, por ejemplo, en aplicaciones biológicas como la separación de sangre. Dichas aplicaciones pueden usar una capa de desgaste como cromo, níquel electrolítico o níquel químico. La deposición química de vapor también podría usarse para aplicar una capa de poli(p-xilixeno) (por ejemplo, parileno) u otro polímero. Los recubrimientos orgánicos y biocompatibles tales como silicona o poliuretano también se contemplan como una superficie de desgaste.

En los sistemas actuales, el sistema funciona a una tensión tal que las partículas quedan atrapadas en la onda estacionaria ultrasónica, es decir, permanecen en una posición estacionaria. Las partículas se recogen en líneas de captura bien definidas, separadas por media longitud de onda. Dentro de cada plano nodal, las partículas quedan atrapadas en los mínimos del potencial de radiación acústica. La componente axial de la fuerza de radiación acústica conduce a las partículas, con un factor de contraste positivo, a los planos nodales de presión, mientras que las partículas con un factor de contraste negativo son conducidas a los planos antinodales de presión. La componente radial o lateral de la fuerza de radiación acústica es la fuerza que captura la partícula. En sistemas que usan transductores habituales, la componente radial o lateral de la fuerza de radiación acústica es habitualmente varios órdenes de magnitud más pequeña que la componente axial de la fuerza de radiación acústica. Por el contrario, la fuerza lateral en los separadores 1 y 30 puede ser significativa, en el mismo orden de magnitud que la componente de fuerza axial, y es suficiente para superar la fuerza de arrastre del fluido a velocidades lineales de hasta 1 cm/s. Tal como se ha analizado anteriormente, la fuerza lateral puede aumentarse accionando el transductor en formas de modo de orden superior, en oposición a una forma de vibración en la que el cristal se mueve efectivamente como un pistón con un desplazamiento uniforme. Estos modos de vibración de orden superior son similares a la vibración de una membrana en modos de tambor, como los modos (1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2), (2, 3) o (m, n), donde m y n son 1 o mayores. La presión acústica es proporcional a la tensión de activación del transductor. La potencia eléctrica es proporcional al cuadrado de la tensión.

La **figura 8** es un modelo informático de un separador acustoforético 92 simulado para producir las **figuras 9 a 17**. El cristal piezocerámico 94 está en contacto directo con el fluido en el canal de agua 96. Entre el cristal 94 y la placa superior de aluminio 100 hay una capa de silicio 98. Un reflector 102 refleja las ondas para crear ondas estacionarias. El reflector está fabricado de un material de alta impedancia acústica, como acero o tungsteno, que proporciona una buena reflexión. Como referencia, el eje Y 104 se denominará dirección axial. El eje X 106 se

denominará dirección radial o lateral. Los modelos de velocidad y presión acústica se calcularon en COMSOL, incluidos los modelos piezoeléctricos del transductor de PZT, los modelos elásticos lineales de la estructura circundante (por ejemplo, placa reflectora y paredes) y un modelo acústico lineal de las ondas en la columna de agua. La velocidad y la presión acústica se exportaron como datos a MATLAB. La fuerza de radiación que actúa sobre una partícula suspendida se calculó en MATLAB utilizando la formulación de Gor'kov. Las propiedades de las partículas y del material fluido, tales como la densidad, la velocidad del sonido y el tamaño de las partículas, se introducen en el programa y se utilizan para determinar las contribuciones de dispersión de monopolo y dipolo. La fuerza de radiación acústica se determina realizando una operación de gradiente en el potencial de campo U, que es una función del volumen de la partícula y la energía potencial y cinética promediadas en el tiempo del campo acústico.

Las **figuras 9A a 9D** muestran simulaciones de la diferencia en la captura entre una sola onda acústica y una onda acústica de múltiples modos. La **figura 9A** muestra la fuerza axial asociada con una sola onda acústica estacionaria. La **figura 9B** muestra la fuerza lateral debida a una sola onda acústica estacionaria. Las **figuras 9C y 9D** muestran la fuerza axial y la fuerza lateral, respectivamente, en una excitación de cristal piezoeléctrico de múltiples modos (modos de vibración de orden superior que tienen múltiples nodos) donde se forman múltiples ondas estacionarias. La entrada eléctrica es la misma que la del modo único de las **figuras 9A y 9B**, pero la fuerza de captura (fuerza lateral) es 70 veces mayor (obsérvese la escala a la derecha en la **figura 9B** en comparación con la de **9D**). Las figuras fueron generadas mediante una simulación de modelado por ordenador de un transductor piezoeléctrico de 1 MHz accionado por 10 V de CA encapsulado en una placa superior de aluminio en un canal de agua abierto terminado por un reflector de acero (véase la **figura 8**). El campo en las **figuras 9A y 9B** es de 960 kHz con una presión máxima de 400 kPa. El campo en las **figuras 9C y 9D** es de 961 kHz con una presión máxima de 1400 kPa. Además de fuerzas más altas, el campo de 961 kHz (**figuras 9C y D**) tiene más gradientes y puntos focales.

La **figura 10** muestra un modelo tridimensional generado por ordenador de un cálculo de la forma de modo para un cristal circular accionado a una frecuencia de 1 MHz.

Las **figuras 11 a 17** se basan en el modelo de la **figura 8** con un transductor piezoeléctrico PZT-8 que funciona a 2 MHz. El transductor mide 1" de ancho y 0,04" de grosor, encapsulado en una placa superior de aluminio (0,125" de grosor) en un canal de agua de 4" x 2", terminado por una placa reflectora de acero (0,180" de grosor). El haz acústico abarca una distancia de 2". La dimensión de profundidad, que es 1", no está incluida en el modelo 2D. El transductor es accionado a 15 V y se realiza un cálculo de barrido de frecuencias para identificar las diversas resonancias acústicas. Se muestran los resultados de las tres frecuencias de resonancia acústica consecutivas, es decir, 1,9964 MHz (**figuras 11, 12 y 13**), 2,0106 MHz (**figuras 14 y 15**) y 2,025 MHz (**figuras 16 y 17**). La fuerza de radiación acústica se calcula para una gotita de aceite con un radio de 5 micras, una densidad de 880 kg/m<sup>3</sup> y una velocidad del sonido de 1700 m/s. El agua es el fluido principal con una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>, una velocidad del sonido de 1500 m/s y una viscosidad dinámica de 0,001 kg/ms. La **figura 11** muestra la fuerza de radiación acústica lateral (horizontal). La **figura 12** muestra la componente axial (vertical) para una frecuencia de resonancia de 1,9964 MHz. La **figura 13** muestra la amplitud de la presión acústica.

Las **figuras 11 y 12** muestran que la magnitud relativa de la componente lateral y axial de la fuerza de radiación es muy similar, aproximadamente de 1,2e-10 N, lo que indica que es posible crear grandes fuerzas de captura, donde la componente de fuerza lateral es de magnitud similar o mayor que la componente axial. Este es un resultado nuevo y contradice los resultados habituales mencionados en la bibliografía.

Un segundo resultado es que la magnitud de la fuerza de captura acústica supera la de la fuerza de arrastre del fluido, para velocidades de flujo habituales del orden de mm/s y, por lo tanto, es posible utilizar este campo acústico para capturar la gotita de aceite. Por supuesto, se puede conseguir la captura a velocidades de flujo más altas aumentando la potencia aplicada al transductor. Es decir, la presión acústica es proporcional a la tensión de activación del transductor. La potencia eléctrica es proporcional al cuadrado de la tensión.

Un tercer resultado es que, a la frecuencia mostrada, las altas fuerzas de captura asociadas con este modo de captura particular se extienden por todo el canal de flujo, lo que permite la captura de gotitas de aceite en todo el ancho del canal. Finalmente, una comparación de los mínimos del campo de fuerza de captura acústica, es decir, las ubicaciones de las partículas capturadas, con las ubicaciones de captura observadas de las gotitas en la onda estacionaria muestra una buena concordancia, lo que indica que el modelado COMSOL es de hecho una herramienta precisa para la predicción de la captura acústica de partículas. Esto se mostrará con más detalle a continuación.

La **figura 14** muestra la componente de fuerza lateral a una frecuencia de resonancia de 2,0106 MHz, y la **figura 15** muestra la componente de fuerza de radiación acústica axial a una frecuencia de resonancia de 2,0106 MHz. Las **figuras 14 y 15** exhiben fuerzas de captura de pico más altas que las **figuras 11 y 12**. Las fuerzas de radiación acústica lateral superan la fuerza de radiación axial. Sin embargo, las fuerzas de captura más altas se encuentran en la parte superior del canal de flujo y no abarcan toda la profundidad del canal de flujo. Por lo tanto, esto representaría un modo que es efectivo para capturar partículas en la parte superior del canal, pero no

necesariamente en todo el canal. Nuevamente, una comparación con patrones de captura medidos indica la existencia de tales modos y patrones de captura.

La **figura 16** muestra la componente de fuerza lateral a una frecuencia de resonancia de 2,025 MHz, y la **figura 17** muestra la componente de fuerza de radiación acústica axial a una frecuencia de resonancia de 2,025 MHz. El campo acústico cambia drásticamente en cada frecuencia de resonancia acústica y, por lo tanto, es esencial un ajuste cuidadoso del sistema. Como mínimo, los modelos 2D son necesarios para una predicción precisa de las fuerzas de captura acústica.

Se desarrollaron modelos 2D axisimétricos para calcular las fuerzas de captura de transductores circulares. Los modelos se usaron para predecir las fuerzas de captura acústica en las partículas, que se pueden usar a continuación para predecir las trayectorias de las partículas en combinación con la acción del arrastre del fluido y las fuerzas de flotación. Los modelos muestran claramente que es posible generar fuerzas de captura acústicas laterales necesarias para capturar partículas y vencer los efectos de la flotabilidad y el arrastre del fluido. Los modelos también muestran que los transductores circulares no proporcionan grandes fuerzas de captura en todo el volumen de la onda estacionaria creada por el transductor, lo que indica que los transductores circulares solo producen altas fuerzas de captura cerca del centro de la onda estacionaria ultrasónica generada por el transductor, pero proporcionan fuerzas de captura mucho más pequeñas hacia los bordes de la onda estacionaria. Esto indica, además, que el transductor circular solo proporciona una captura limitada para una pequeña sección del flujo de fluido que fluiría a través de la onda estacionaria del transductor circular, y no captura cerca de los bordes de la onda estacionaria.

Debido a que los transductores circulares no proporcionan grandes fuerzas de captura en todo el volumen, se investigó el efecto de la forma del transductor en la eficiencia de la separación de aceite. Se utilizaron un cristal de PZT-8 circular de 1" de diámetro (**figura 18**, 110) y un cristal cuadrado de 1" x 1" (**figura 18**, 112). Por lo demás, el experimento se realizó en idénticas condiciones. La Tabla 1 muestra los resultados.

Tabla 1: Resultados de la investigación de la forma del transductor redonda y cuadrada

Forma del transductor	Entrada total de potencia (W)	Caudal (ml/min)	Duración (min)	Eficiencia de la captura (%)
Redonda	20	500	45	59 %
Cuadrada	20	500	30	91 %

Los resultados indican que el transductor cuadrado 112 proporciona mejores eficiencias de separación de aceite que el transductor redondo 110, explicado por el hecho de que el transductor cuadrado 112 proporciona una mejor cobertura del canal de flujo con fuerzas de captura acústicas, y por que el transductor redondo solo proporciona fuertes fuerzas de captura a lo largo de la línea central de la onda estacionaria, confirmando los hallazgos de las simulaciones numéricas.

Además de la forma del transductor, la forma del modo del transductor (en qué forma está vibrando el transductor) afecta la eficiencia de separación de aceite. Producir más nodos proporciona más lugares para que el aceite quede atrapado. La **figura 19** muestra la amplitud de la impedancia eléctrica medida del transductor en función de la frecuencia en la proximidad de la resonancia del transductor de 2,2 MHz. Los mínimos en la impedancia del transductor corresponden a resonancias acústicas de la columna de agua y representan frecuencias potenciales para la operación. El modelado numérico ha indicado que el perfil de desplazamiento del transductor varía significativamente en estas frecuencias de resonancia acústica y, por lo tanto, afecta directamente a la onda acústica estacionaria y la fuerza de captura resultante. La forma del modo de desplazamiento del transductor varía de un modo de solo media longitud de onda a una forma de modo de tres medias longitudes de onda. Los patrones de desplazamiento modal del transductor de orden superior dan como resultado fuerzas de captura más altas y múltiples ubicaciones de captura estables para las gotitas de aceite capturadas. Un modo de solo media longitud de onda tiene como resultado una línea de gotitas capturadas, mientras que un modo de tres medias longitudes de onda tiene como resultado tres líneas paralelas de gotitas capturadas a través del canal de fluido.

Para investigar el efecto de la forma del modo del transductor sobre la fuerza de captura acústica y las eficiencias de separación de aceite, se repitió un experimento diez veces, con todas las condiciones idénticas excepto por la frecuencia de excitación. Como frecuencias de excitación se usaron diez frecuencias de resonancia acústica consecutivas, indicadas por los números rodeados por un círculo 1 a 9 y la letra A en la **figura 19**. Las condiciones fueron una duración del experimento de 30 min, una concentración de aceite de 1000 ppm, un caudal de 500 ml/min y una potencia aplicada de 20 W.

A medida que la emulsión pasaba por el transductor, se observaron y caracterizaron las líneas nodales de captura. La caracterización implicó la observación y el diseño del número de líneas nodales de captura a través del canal de fluido, como se muestra en la **figura 20**, para siete de las diez frecuencias de resonancia identificadas en la **figura 19**.

El efecto de la frecuencia de excitación determina claramente el número de líneas nodales de captura, que varían desde una sola línea de captura en la frecuencia de excitación de la resonancia acústica 5 y 9, hasta nueve líneas nodales de captura para la frecuencia de resonancia acústica 4. En otras frecuencias de excitación se observaron cuatro o cinco líneas nodales de captura. Estos resultados observados experimentalmente confirman los resultados esperados de las diferencias cuando las **figuras 9A y 9B** se comparan con las **figuras 9C y 9D**. Los diferentes modos de vibración del transductor pueden producir diferentes (más) nodos de las ondas estacionarias, donde más nodos crean, en general, fuerzas de captura más altas.

La tabla 2 resume los hallazgos de un experimento de captura de aceite que usa un sistema similar al de la **figura 1**. Una conclusión importante es que la eficiencia de la separación de aceite del separador acústico está directamente relacionada con la forma del modo del transductor. Los desplazamientos modales de orden superior generan fuerzas de captura acústica más grandes y más líneas nodales de captura que dan lugar a mejores eficiencias. Una segunda conclusión, útil para estudios de escala, es que las pruebas indican que la captura de gotitas de aceite de 5 micras a 500 ml/min requiere 10 vatios de potencia por pulgada cuadrada de área del transductor por 1" de amplitud de haz acústico. La principal disipación es la de la absorción termoviscosa en el gran volumen de la onda acústica estacionaria. El coste de energía asociado con este caudal es de 0,667 kWh por metro cúbico.

Tabla 2: Estudio de la eficiencia de la captura de los patrones de captura

Ubicación del pico de resonancia	Entrada total de potencia (W)	Número de nodos de captura	Caudal (ml/min)	Duración (min)	Eficiencia de la captura (%)
4	20	9	500	30	91 %
8	20	5	500	30	58 %
A	20	4	500	30	58 %
9	20	2	500	30	37 %

Las **figuras 21 y 22** muestran fotos de las gotitas de aceite capturadas en el patrón de nueve líneas nodales de captura. Las líneas discontinuas se superponen sobre las líneas nodales. La **figura 23** muestra el campo de presión, calculado en COMSOL que coincide con el patrón de 9 líneas nodales de captura. El modelo numérico es un modelo bidimensional y, por lo tanto, solo se observan tres columnas de captura. Existen dos conjuntos más de tres columnas de captura en la tercera dimensión perpendicular al plano del modelo bidimensional de las **figuras 21 y 22**. Esta comparación indica que el modelo numérico es preciso para predecir la naturaleza de la onda estacionaria ultrasónica y las fuerzas de captura resultantes, confirmando nuevamente los resultados esperados de las diferencias cuando las **figuras 9A y 9B** se comparan con las **figuras 9C y 9D**.

En sistemas más grandes, son posibles diferentes disposiciones de transductores. La **figura 24** muestra una disposición de transductores 120 que incluye tres cristales cuadrados de 1" x 1" 120a, 120b, 120c. Dos cuadrados son paralelos entre sí y el tercer cuadrado está desplazado para formar un patrón triangular. La **figura 25** muestra una disposición 122 de transductores que incluye dos cristales rectangulares de 1" x 2,5" 122a, 122b dispuestos con sus ejes largos paralelos entre sí. La disipación de potencia por transductor fue de 10 W por área de sección transversal del transductor de 1" x 1" y por pulgada de la amplitud de la onda estacionaria acústica a fin de obtener suficientes fuerzas de captura acústica. Para un tramo de 4" de un sistema de escala intermedia, cada transductor cuadrado de 1" x 1" consume 40 W. El transductor rectangular más grande de 1" x 2,5" usa 100 W en un sistema de escala intermedia. La disposición de tres transductores cuadrados de 1" x 1" consumiría un total de 120 W y la disposición de dos transductores de 1" x 2,5" consumiría aproximadamente 200 W.

En la **figura 26** se muestra un sistema 124 de escala intermedia de 4" para separar un fluido huésped de un fluido o partículas flotantes. El fluido huésped es introducido en la entrada 126 y fluye hacia el separador 128, que incluye una disposición de transductores 130, y el reflector 132. El separador crea ondas estacionarias 134 para aglomerar fluido o partículas flotantes (por ejemplo, aceite). La fuerza de flotación 136 lleva el material flotante a la cámara de recogida 140.

La disposición de transductores 120 se instaló en el sistema 124, se retiró y a continuación se instaló la disposición 122 de transductores. Las disposiciones se hicieron funcionar en paralelo de tal manera que cada transductor fue accionado por la misma señal de tensión del amplificador. El circuito de accionamiento electrónico constaba de un generador de funciones y un amplificador de RF A300 ENI de 300 W. Los resultados de la prueba se muestran en la Tabla 3. La primera prueba usó solo los dos transductores cuadrados de 1" x 1" o la disposición 120, orientados en paralelo entre sí, y se hizo funcionar a una velocidad de flujo de 1300 ml/min. Esto dio lugar a una eficiencia de separación del aceite del 88 %. La siguiente prueba incluyó los tres transductores cuadrados y un caudal de 2000 ml/min, y produjo una eficiencia del 93 %. Estos resultados son excelentes y demuestran que la tecnología es escalable a canales de flujos mayores accionados por disposiciones de transductores. El siguiente conjunto de pruebas incluyó la disposición de transductores rectangulares de 1" x 2,5" 122. Para la primera prueba, solo se ejecutó un transductor y produjo una eficiencia del 87 %. La segunda prueba con ambos transductores en funcionamiento produjo una eficiencia del 97 %. Para los transductores de 1" x 2,5", el nivel de potencia que se usó

se basó en hacer funcionar el transductor a niveles seguros. Para estas pruebas, el coste de energía para el sistema intermedio es de 1 kWh por metro cúbico.

Tabla 3: Resultados de la prueba del sistema intermedio

Configuración de los transductores	Número de transductores activos	Entrada total de potencia (W)	Caudal (ml/min)	Duración (min)	Eficiencia de la captura (%)
Transductores de 1" x 1"	2	80	1300	15	88 %
Transductores de 1" x 1"	3	120	2000	15	93 %
Transductores de 1" x 2,5"	1	100	2000	8	87 %
Transductores de 1" x 2,5"	2	100	1000	15	97 %

5 El modelado numérico también se realizó para el sistema de tamaño intermedio con una amplitud de 4" para la onda acústica estacionaria. Se modelaron múltiples transductores para investigar el efecto de acoplamiento entre transductores. Se realizaron barridos de frecuencia y se identificaron las frecuencias de resonancia para las cuales las formas del modo acústico se acoplan fuertemente a las formas de modo de orden superior del transductor. Las comparaciones entre los resultados numéricos y experimentales son excelentes y demuestran la precisión de los modelos. La **figura 27** muestra el campo de presión acústica de un modelo con dos transductores en el lado derecho. Una fotografía de las gotitas de aceite capturadas en la onda estacionaria se muestra en la **figura 28**. Tanto el experimento como el modelo muestran rasgos característicos idénticos. A ciertas frecuencias de excitación, las gotitas de aceite quedaron atrapadas en la onda estacionaria totalmente fuera del volumen del fluido definido por el área del transductor, lo que indica un campo acústico expandido con fuertes fuerzas de captura. La **figura 29** muestra una fotografía de tales gotitas de aceite capturadas. La **figura 30** muestra un modelo de campo de presión acústica que predice rasgos característicos idénticos.

20 La presente invención se ha descrito haciendo referencia a realizaciones a modo de ejemplo. Obviamente, se podrán considerar modificaciones y alteraciones al leer y comprender la descripción detallada anterior. Se pretende que la presente invención se interprete como que incluye todas esas modificaciones y alteraciones en la medida en que estén dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de separación de impurezas de un fluido huésped, comprendiendo el procedimiento:
- 5 proporcionar una cámara de flujo que tiene una fuente de energía acústica y, en un lado opuesto de la cámara de flujo, un reflector de energía acústica;  
hacer fluir el fluido huésped a través de la cámara de flujo;  
aplicar la fuente de energía acústica al fluido huésped para crear una onda estacionaria ultrasónica tridimensional, en el que la onda estacionaria ultrasónica tridimensional da lugar a una fuerza de radiación acústica que tiene una  
10 componente axial y una componente lateral que son del mismo orden de magnitud  
en el que la fuente de energía acústica es un transductor ultrasónico en una pared de la cámara de flujo, incluyendo el transductor un cristal piezoeléctrico que define un lado del transductor, siendo accionado el transductor por una señal de tensión oscilante, periódica o de impulsos a una frecuencia de resonancia ultrasónica que acciona el transductor para crear la onda estacionaria ultrasónica tridimensional en la cámara de flujo.
- 15 2. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que la onda estacionaria crea líneas nodales y la componente lateral captura las impurezas en las líneas nodales.
3. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que:
- 20 la cámara de flujo tiene una entrada y una salida; y  
un reflector ubicado en una pared en el lado opuesto de la cámara de flujo con respecto al transductor.
- 25 4. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que el cristal piezoeléctrico es accionado en un modo de desplazamiento no uniforme.
5. Procedimiento, según la reivindicación 4, en el que el cristal piezoeléctrico es accionado en una forma de modo de orden superior que tiene más de una línea nodal de captura.
- 30 6. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que el cristal piezoeléctrico del transductor queda expuesto directamente al fluido que fluye a través de la cámara de flujo, o en el que el cristal cerámico está fabricado de PZT-8 o en el que el cristal cerámico es cuadrado.
- 35 7. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que el transductor tiene un cuerpo envolvente que contiene el cristal piezoeléctrico.
8. Procedimiento, según la reivindicación 7, en el que el cuerpo envolvente incluye una parte superior y una separación de aire, estando dispuesta la separación de aire entre la parte superior y el cristal piezoeléctrico.
- 40 9. Procedimiento, según la reivindicación 8, en el que el cristal piezoeléctrico no tiene una capa de apoyo.
10. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que la cámara de flujo tiene una bolsa de recogida en una pared de la cámara de flujo, o en el que la cámara de flujo incluye, además, un difusor en la entrada.
- 45 11. Procedimiento, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las impurezas incluyen partículas o fluidos distintos del fluido huésped.
12. Procedimiento, según la reivindicación 3, en el que el cristal piezoeléctrico está soportado por madera de balsa o corcho.
- 50 13. Procedimiento, según la reivindicación 2, en el que las impurezas capturadas en las líneas nodales se unen o aglomeran de tal modo que las impurezas más pesadas que el agua son separadas por decantación gravitacional mejorada y las partículas más ligeras que el agua son separadas por flotabilidad mejorada.
- 55

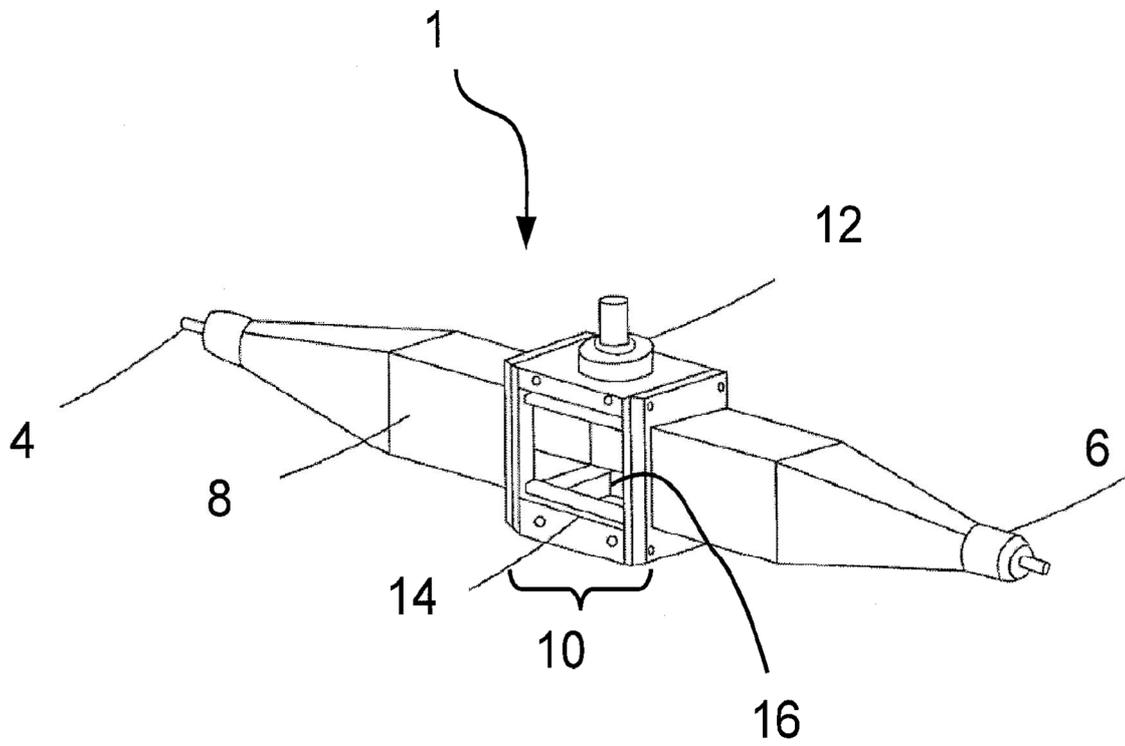


FIGURA 1

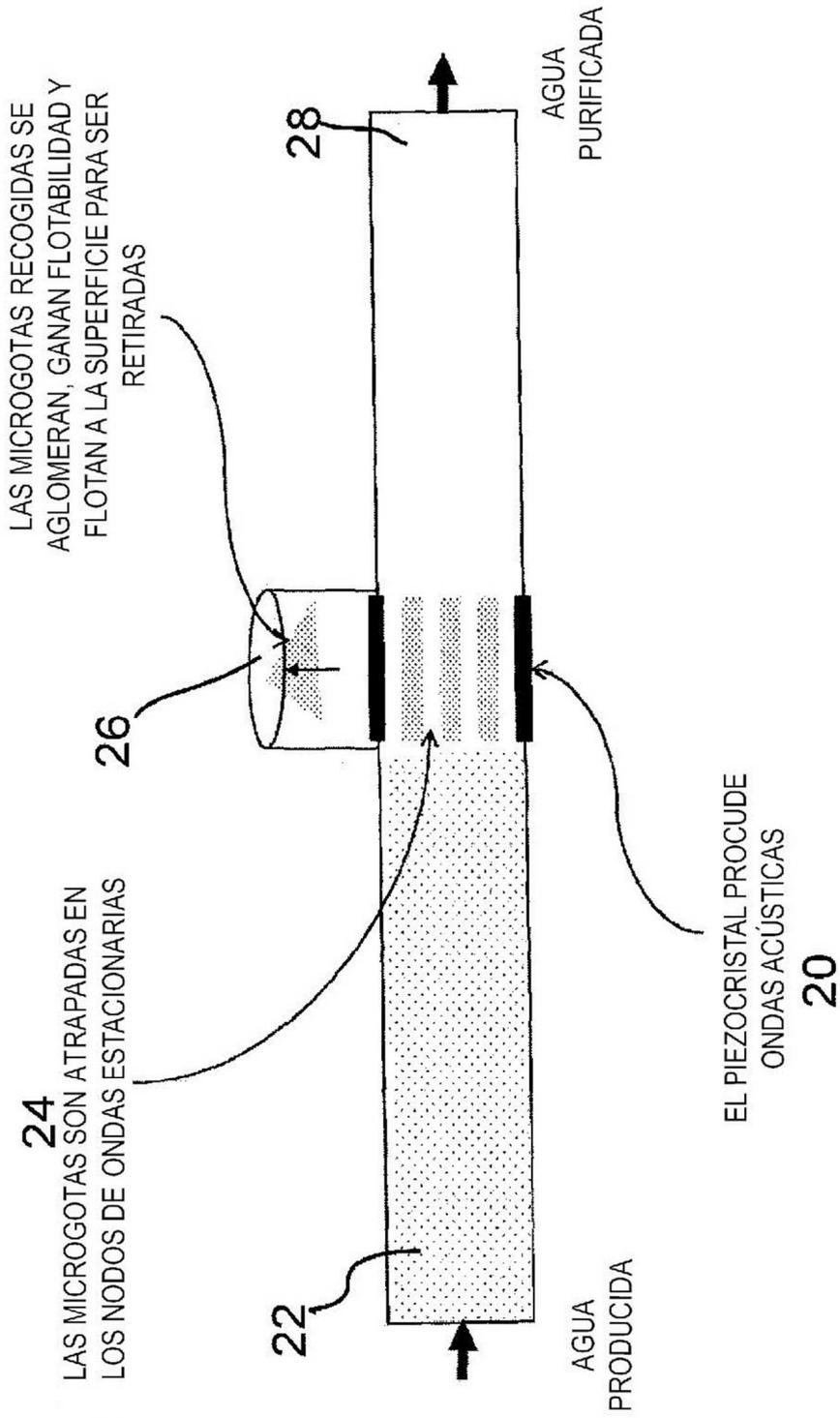


FIGURA 2

20

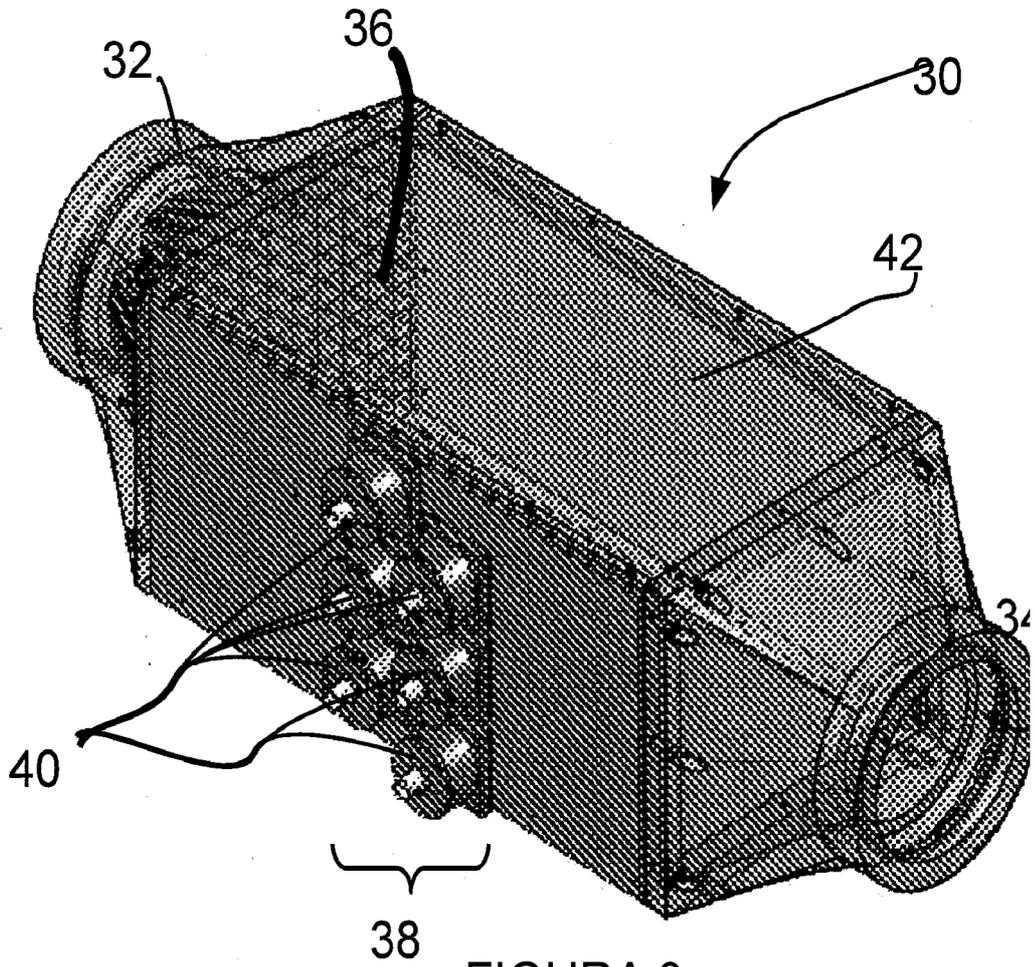


FIGURA 3

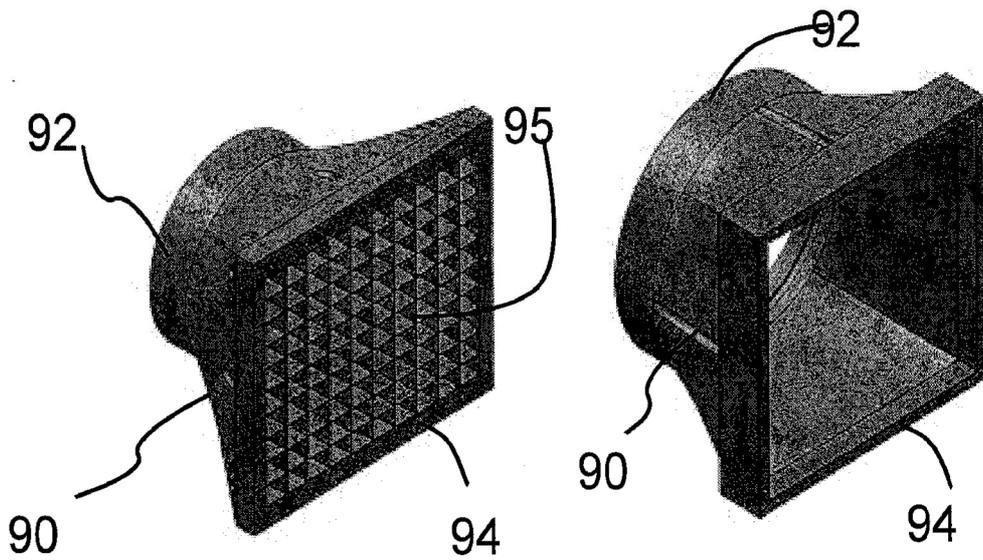


FIGURA 4A

FIGURA 4B

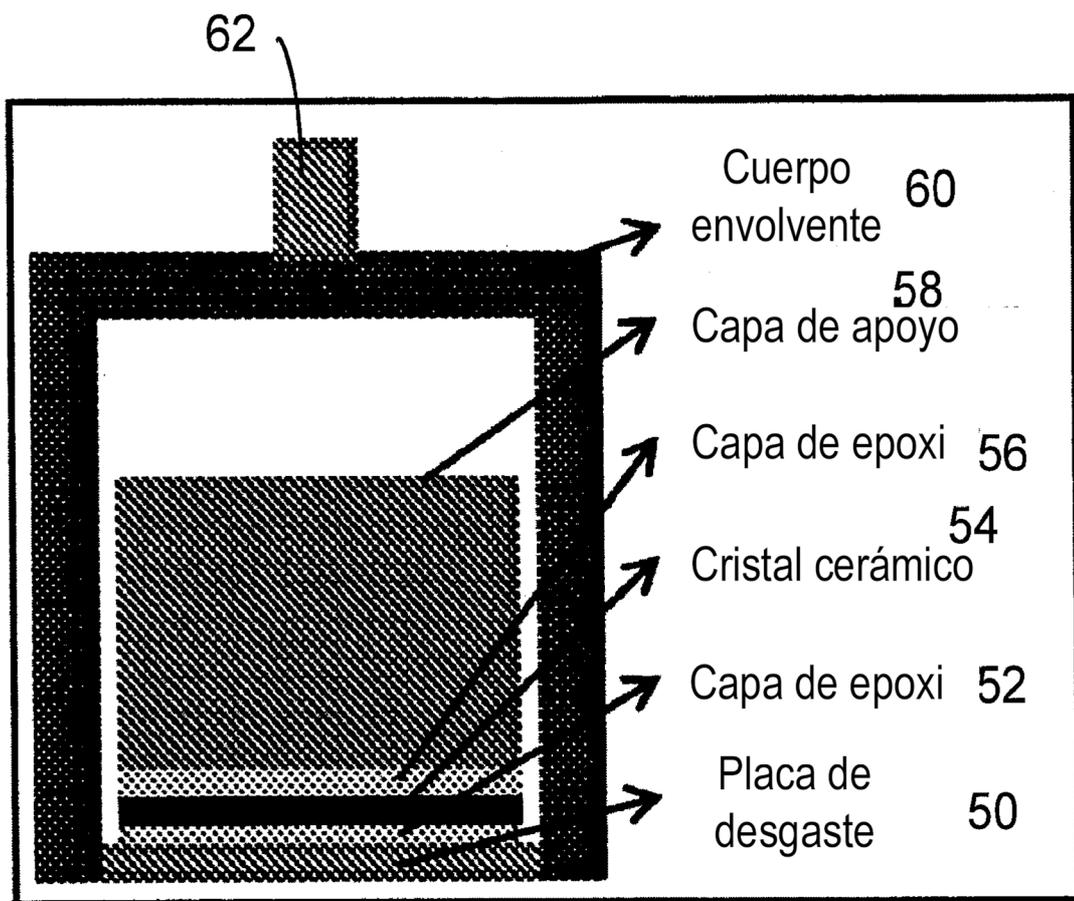


FIGURA 5

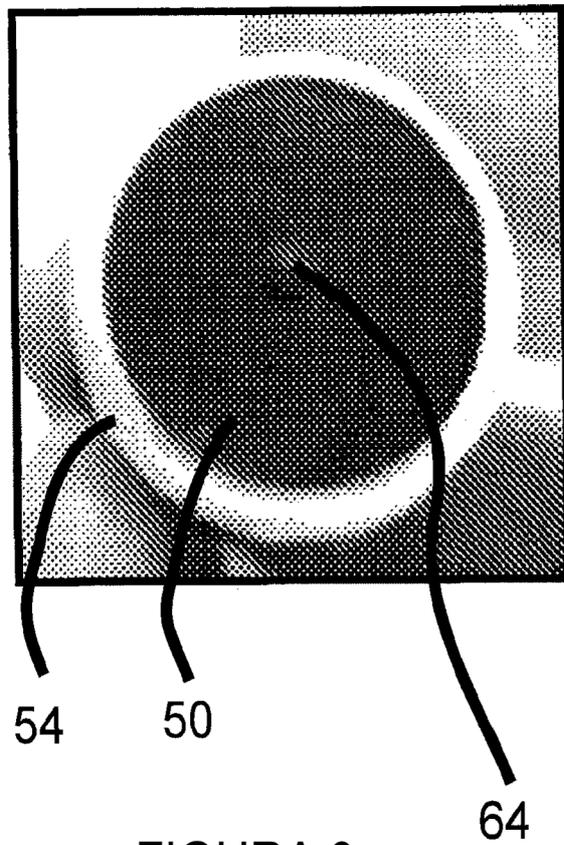


FIGURA 6

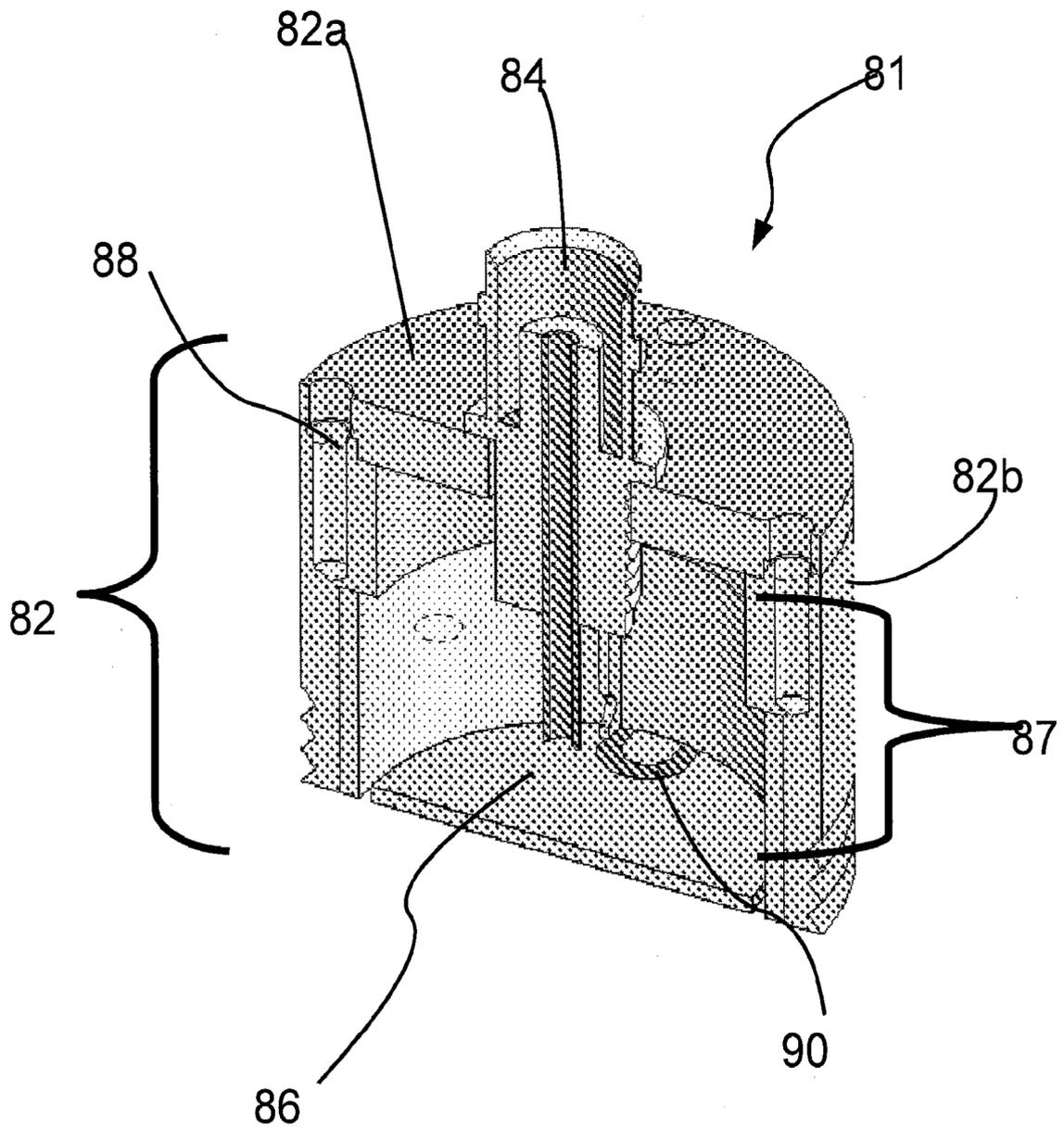


FIGURA 7

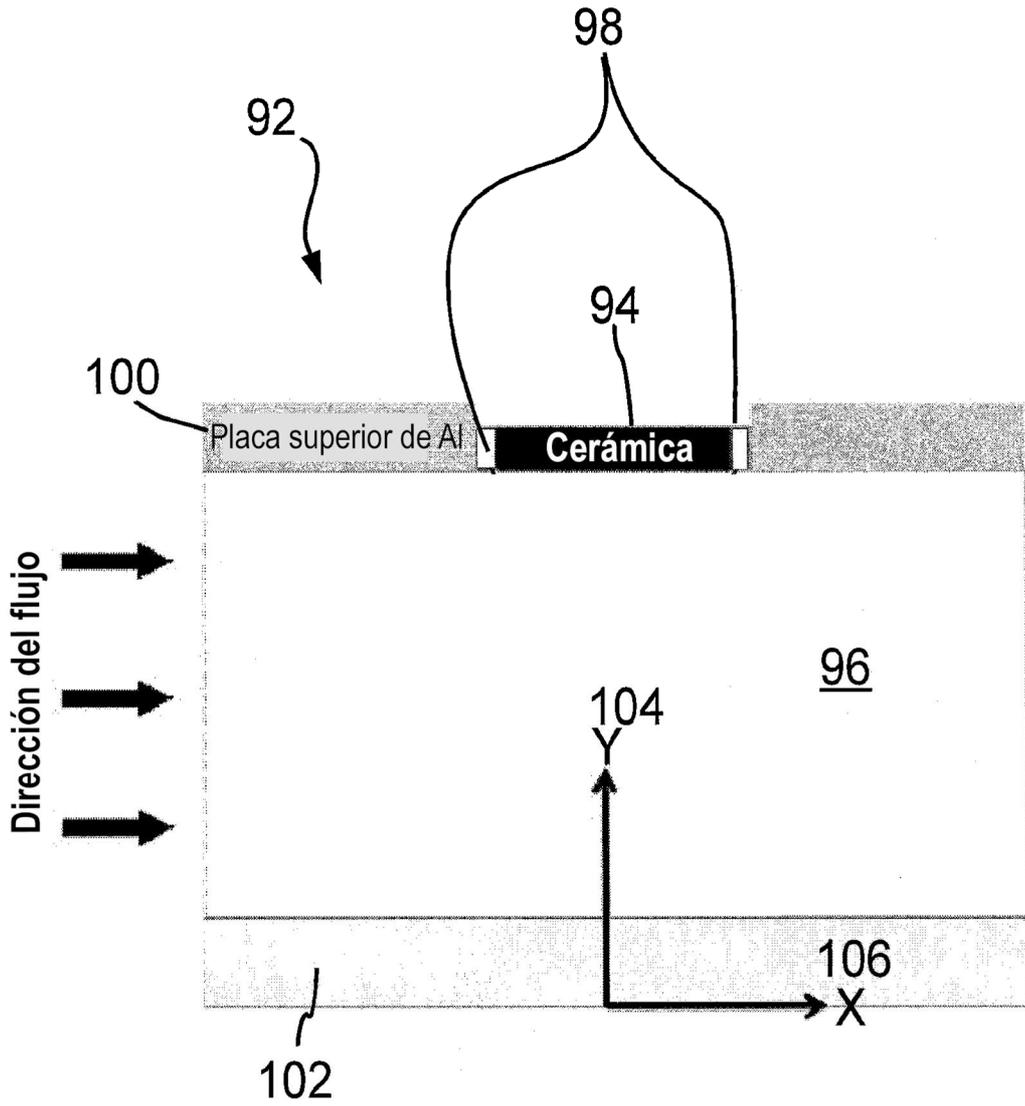


FIGURA 8

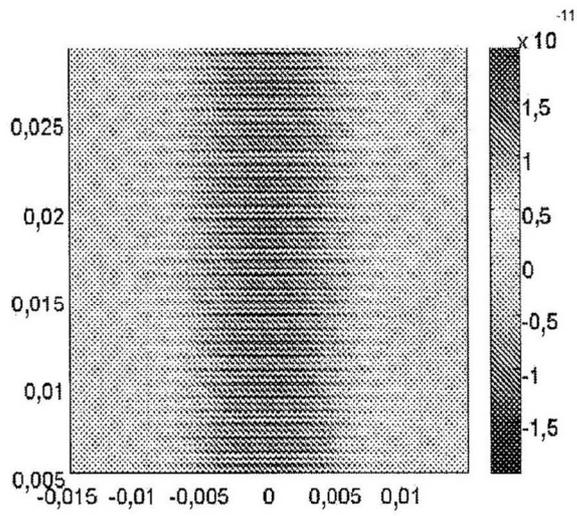


FIGURA 9A

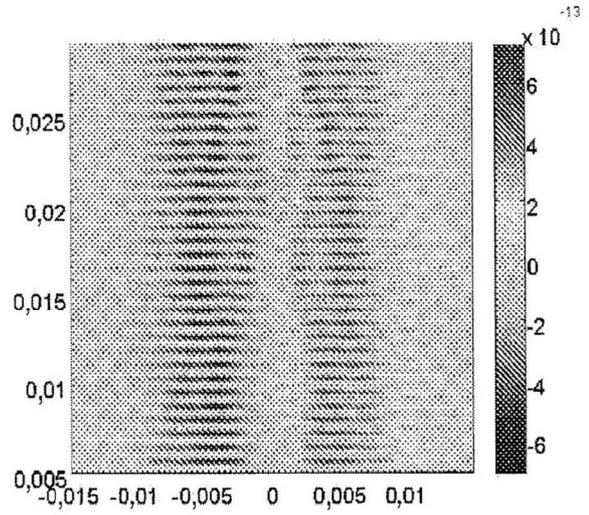


FIGURA 9B

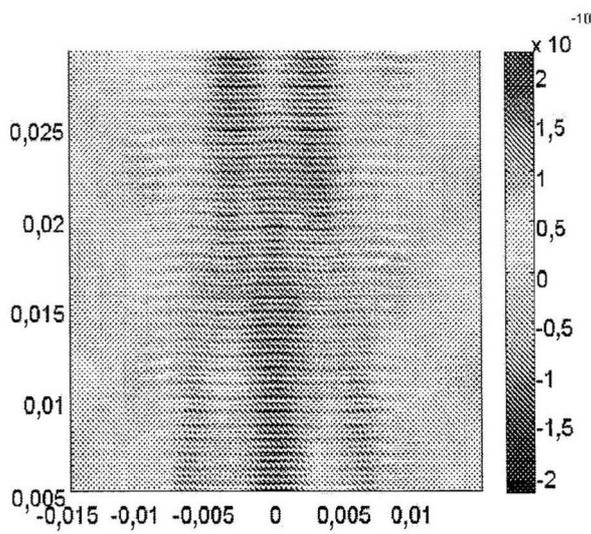


FIGURA 9C

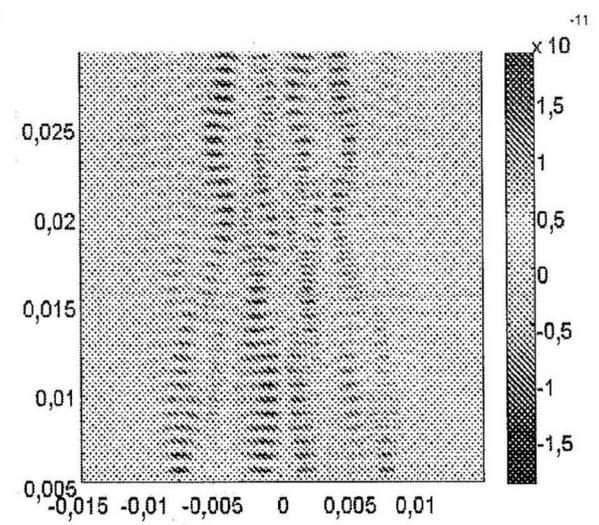


FIGURA 9D

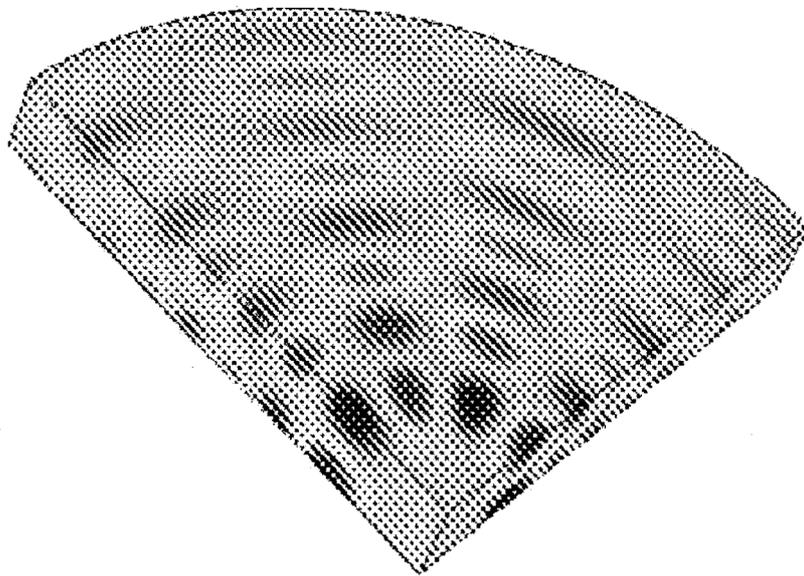


FIGURA 10

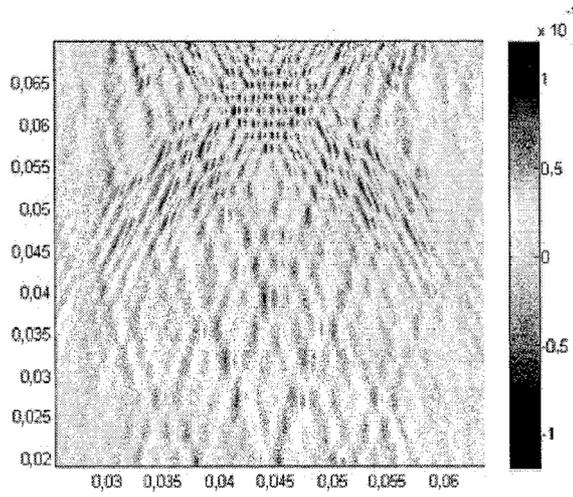


FIGURA 11

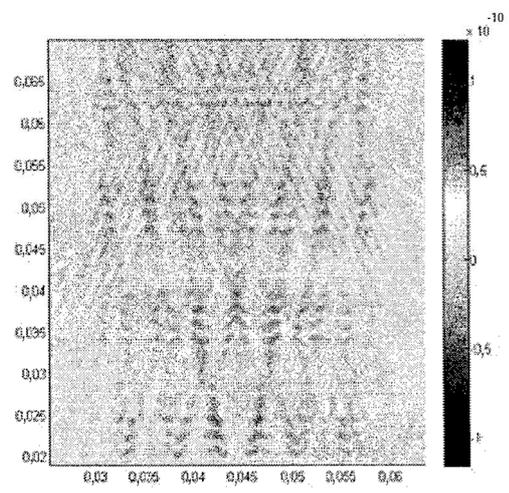


FIGURA 12

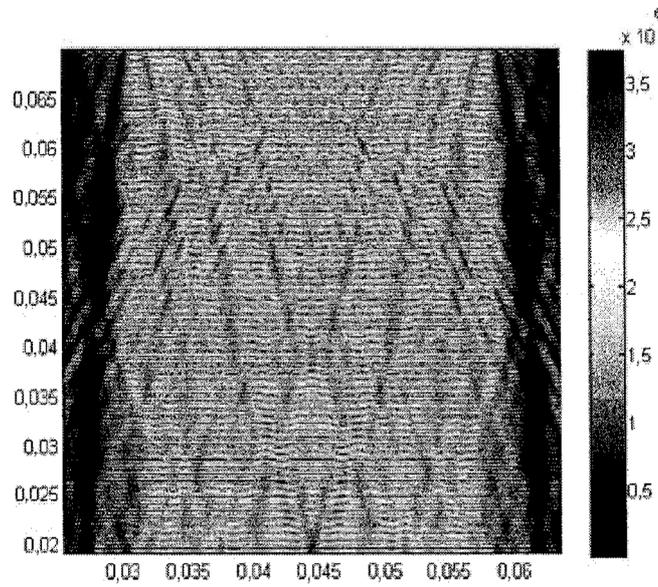


FIGURA 13

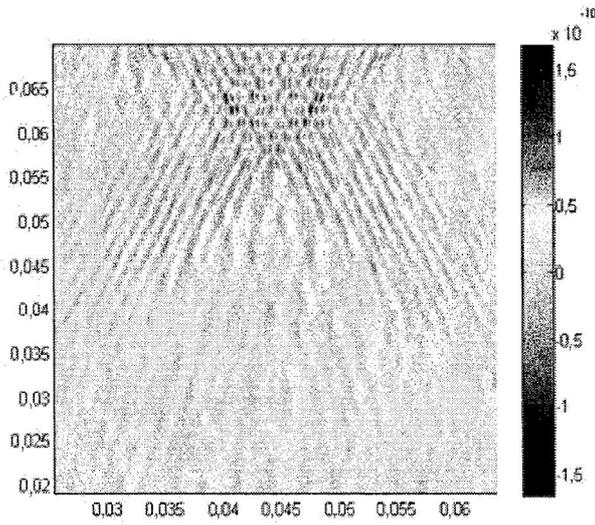


FIGURA 14

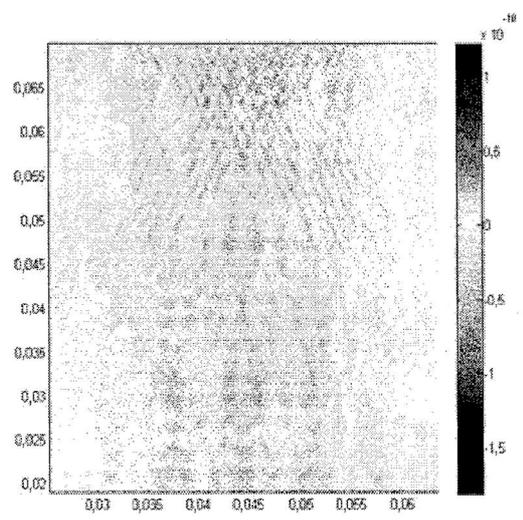


FIGURA 15

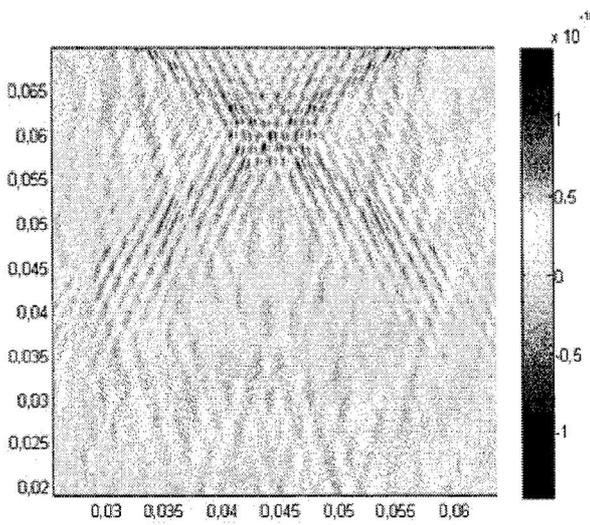


FIGURA 16

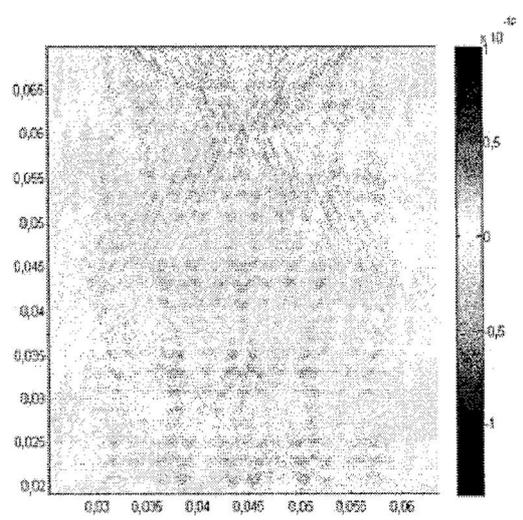


FIGURA 17

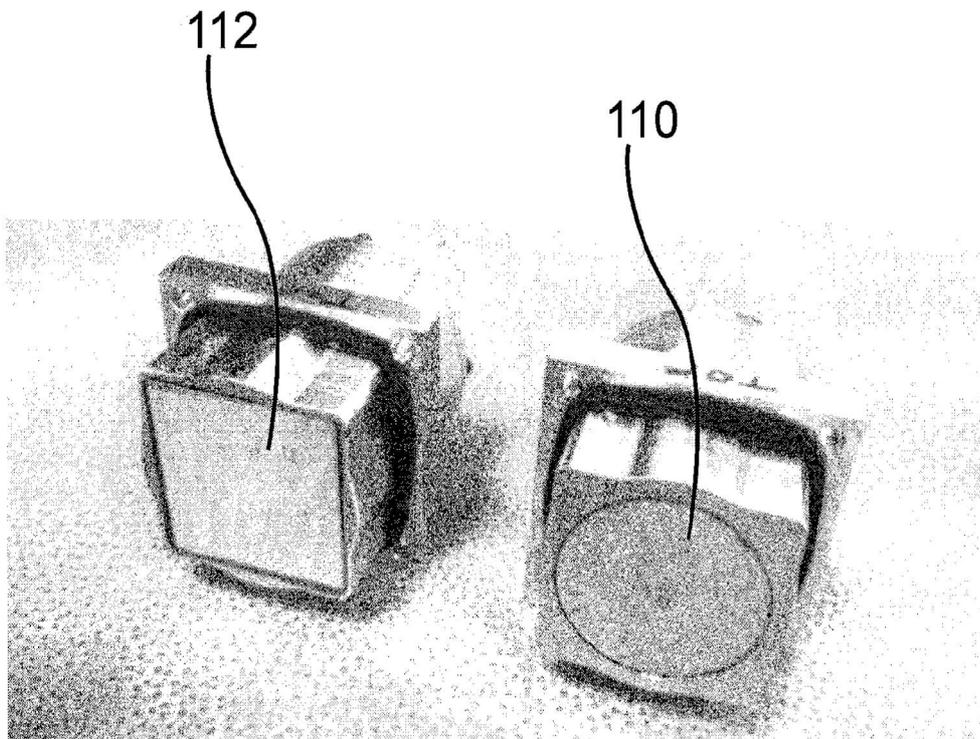


FIGURA 18

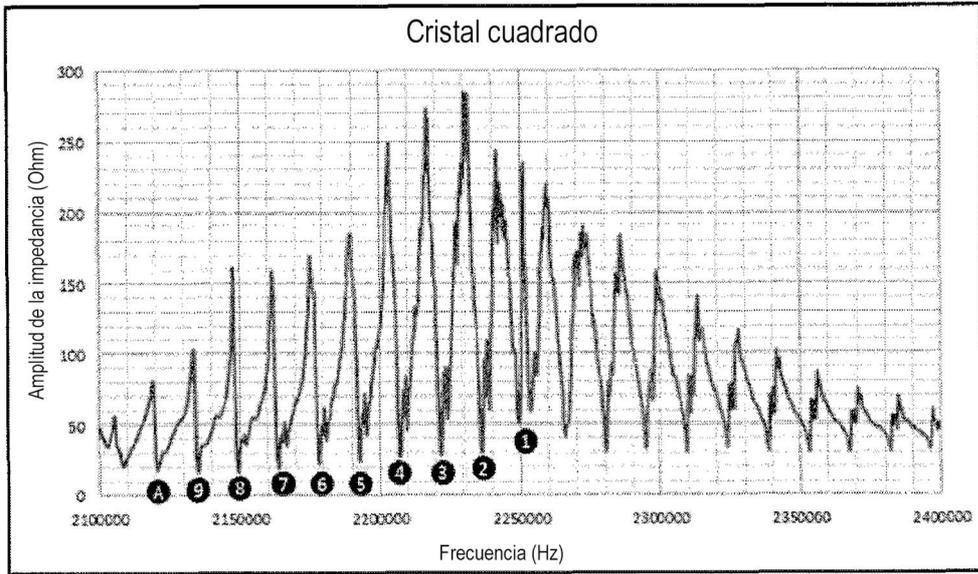


FIGURA 19

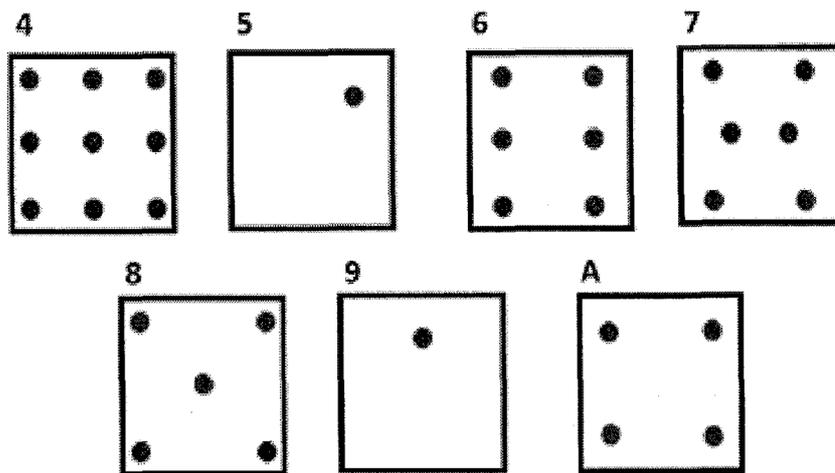


FIGURA 20



FIGURA 21

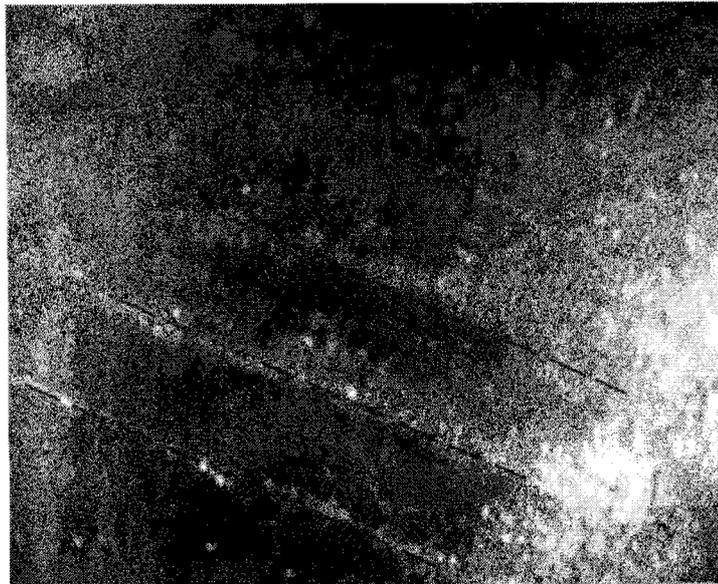


FIGURA 22

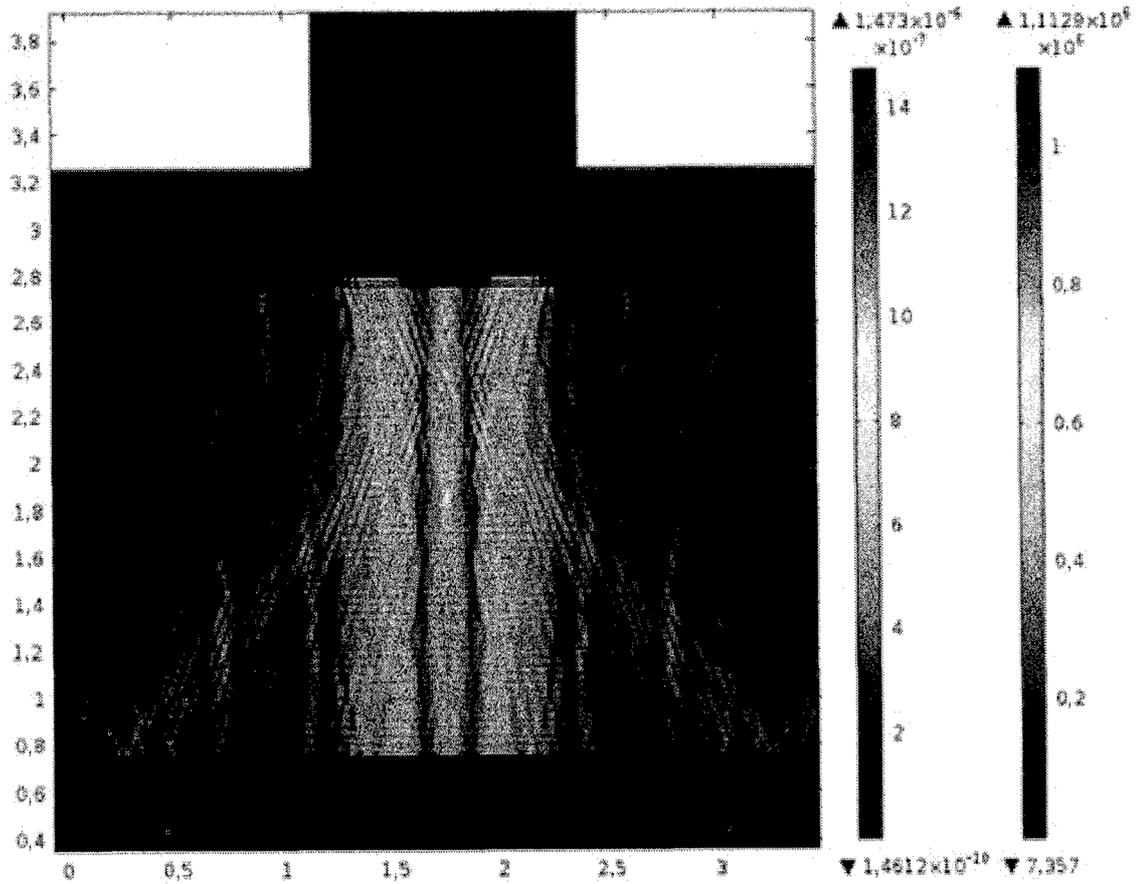


FIGURA 23

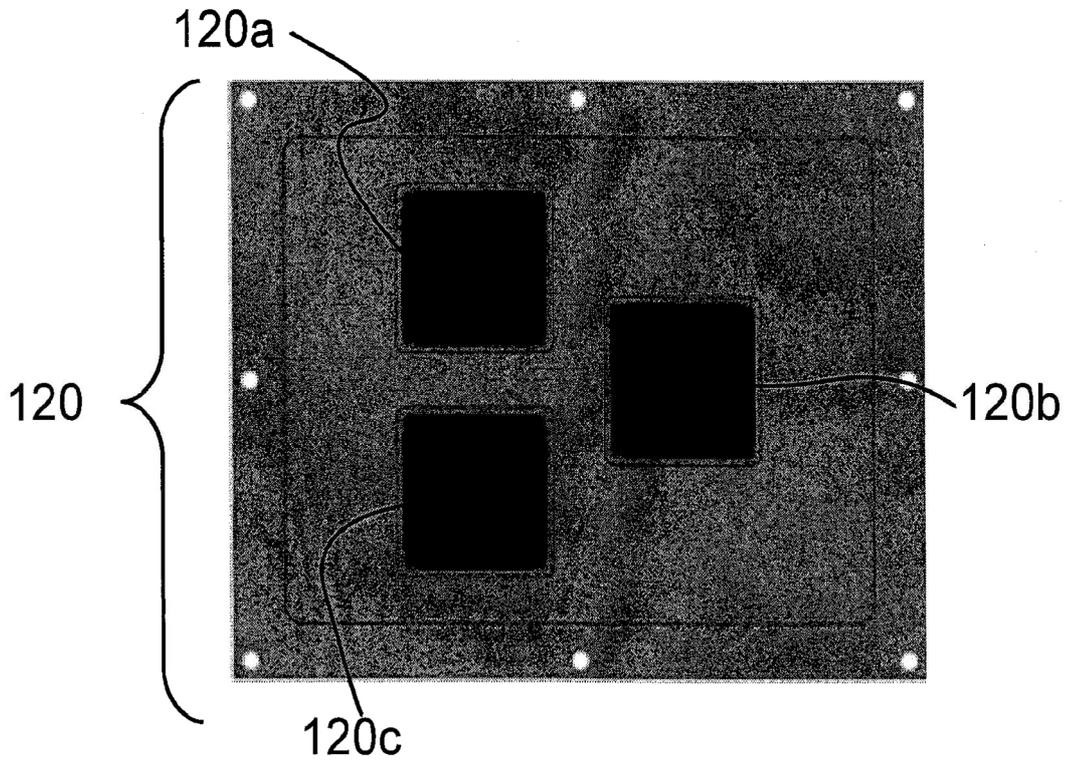


FIGURA 24

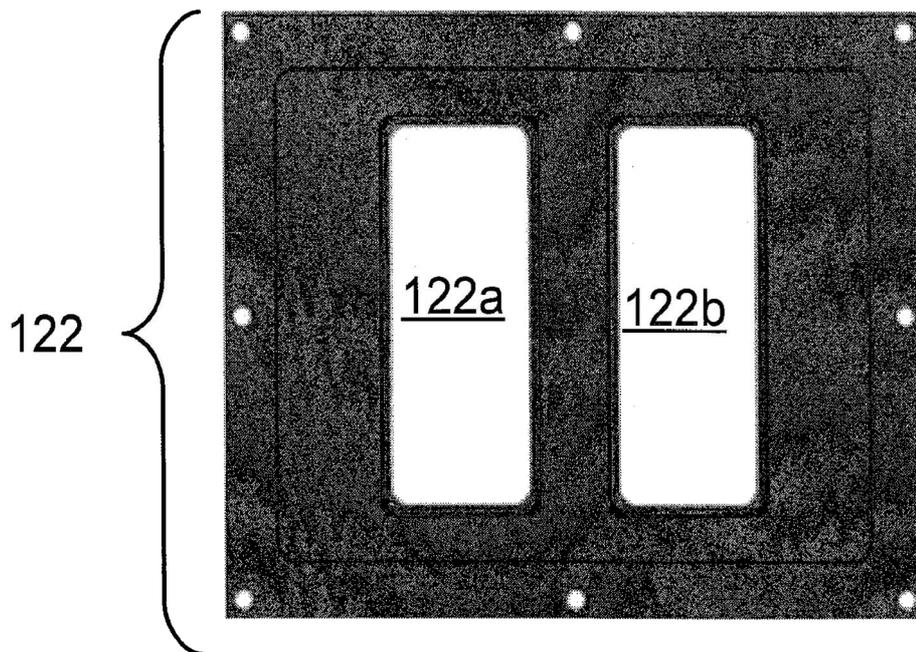


FIGURA 25

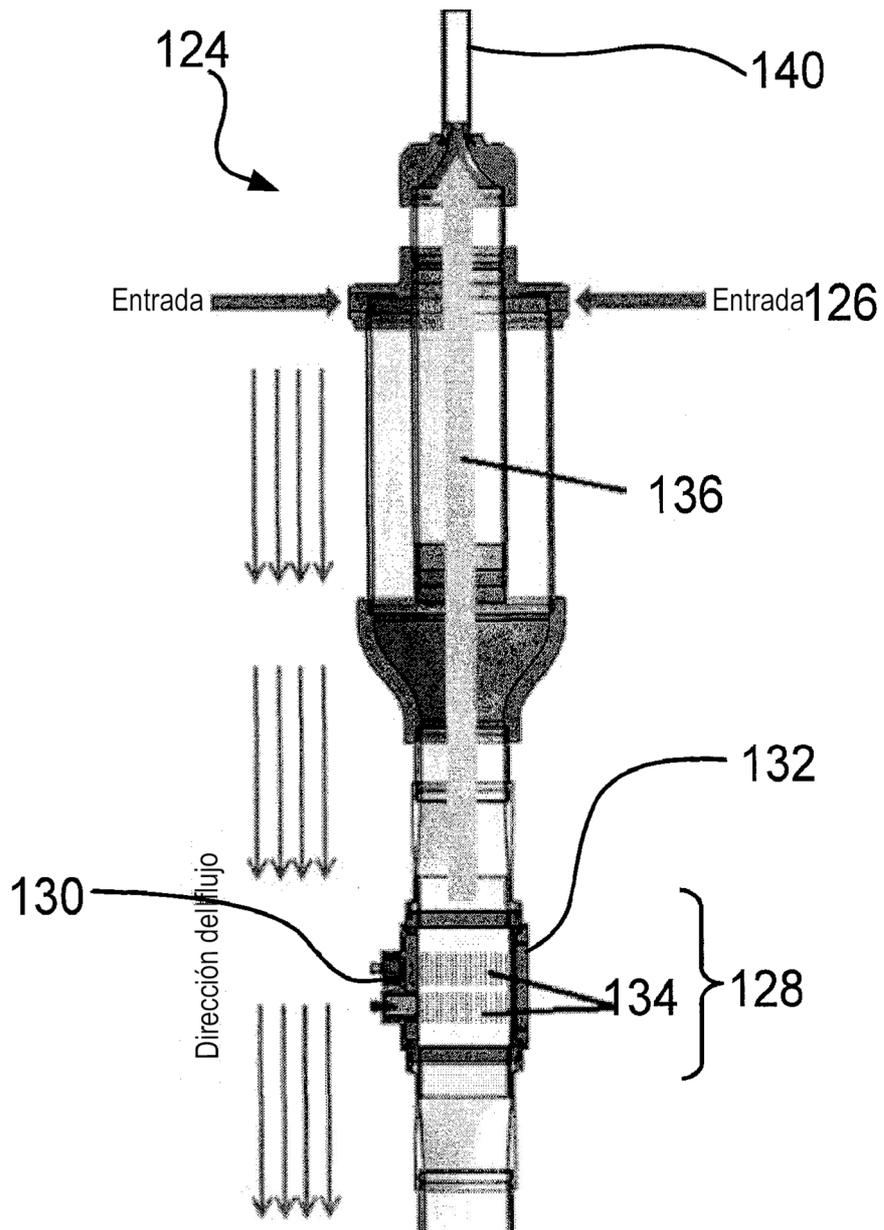


FIGURA 26

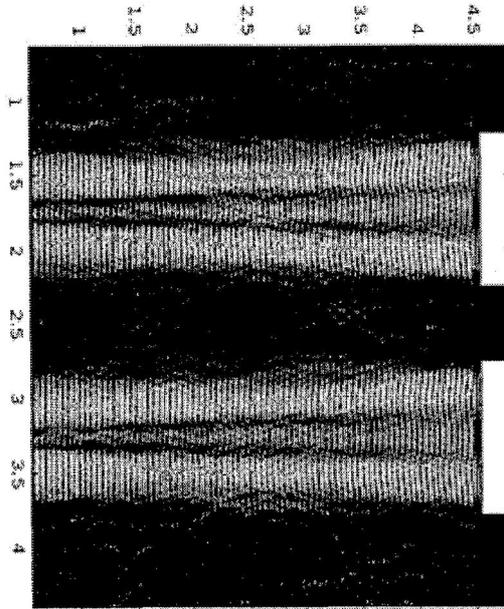


FIGURA 27

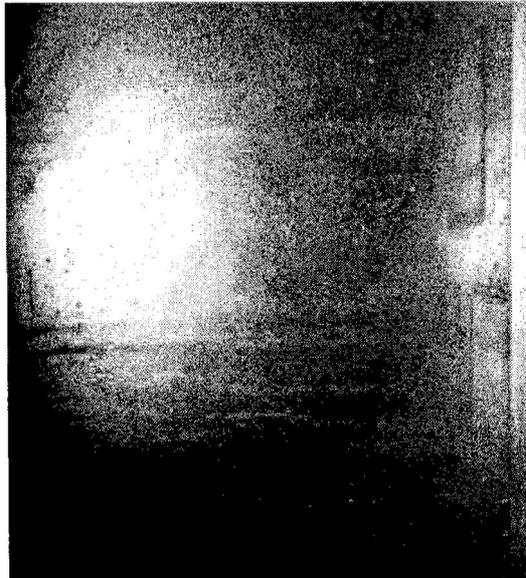


FIGURA 28

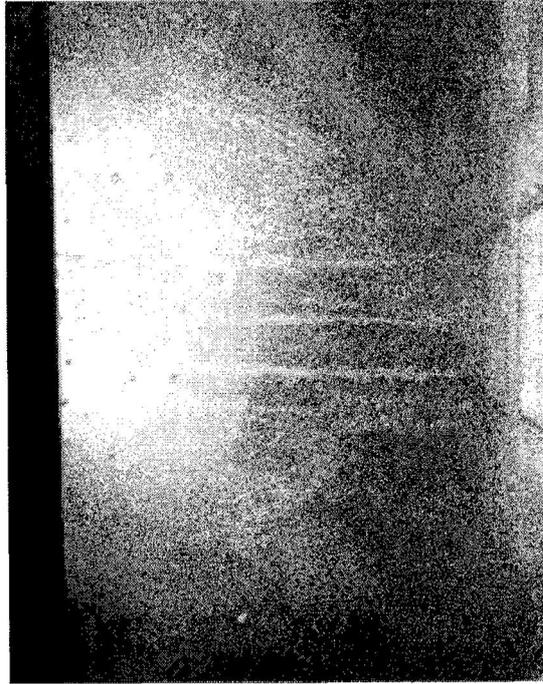


FIGURA 29

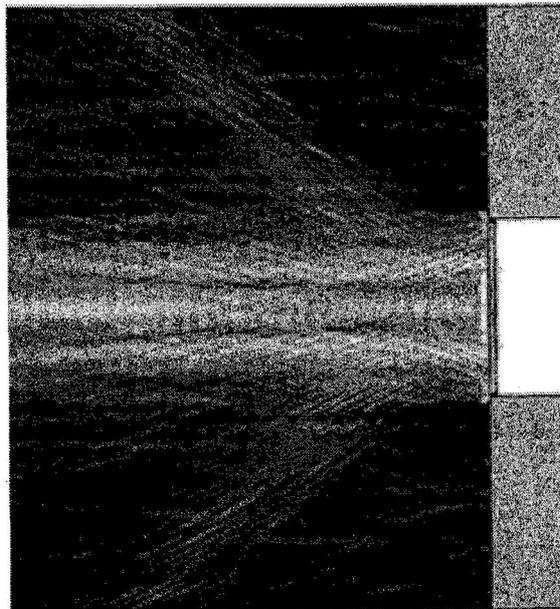


FIGURA 30

**REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN**

5 *Esta lista de referencias citada por el solicitante es únicamente para mayor comodidad del lector. No forman parte del documento de la Patente Europea. Incluso teniendo en cuenta que la compilación de las referencias se ha efectuado con gran cuidado, los errores u omisiones no pueden descartarse; la EPO se exime de toda responsabilidad al respecto.*

**Documentos de patentes citados en la descripción**

- US 2011278218 A
- US 2012325727 A
- US 2012328477 A

10