(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 799 527**

(51) Int. CI.:

G01F 1/66 (2006.01)
G01P 5/24 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.07.2015 E 17190281 (0)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.06.2020 EP 3273206**

(54) Título: **Caudalímetro de tiempo de desplazamiento de señal mejorado**

(30) Prioridad:

29.07.2014 WO PCT/IB2014/063502

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.12.2020

(73) Titular/es:

GWF MESSSYSTEME AG (100.0%)
Obergrundstrasse 119
6002 Luzern, CH

(72) Inventor/es:

HIES, THOMAS WERNER;
LUONG, TRUNG DUNG;
OHL, CLAUS-DIETER y
SKRIPALLE, JUERGEN HEINZ-FRIEDRICH

(74) Agente/Representante:

DURAN-CORRETJER, S.L.P

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

Caudalímetro de tiempo de desplazamiento de señal mejorado

La presente solicitud hace referencia a caudalímetros, y, en concreto, a caudalímetros de tiempo de desplazamiento por ultrasonidos.

En la actualidad, se utilizan diversos tipos de caudalímetros para medir el caudal volumétrico de un fluido, tal como un líquido o un gas, a través de una tubería. Los caudalímetros ultrasónicos son caudalímetros Doppler, que utilizan el efecto Doppler acústico, o caudalímetros de tiempo de desplazamiento, denominados también, en ocasiones, caudalímetros de transmisión, que utilizan una diferencia de tiempo de propagación causada por el movimiento relativo de la fuente y el medio. El tiempo de desplazamiento se conoce, asimismo, como tiempo de vuelo o tiempo de tránsito.

Un caudalímetro ultrasónico de tiempo de desplazamiento evalúa la diferencia del tiempo de propagación de los pulsos ultrasónicos que se propagan en el sentido del flujo y en sentido contrario al mismo. Los caudalímetros ultrasónicos están dispuestos como caudalímetros en línea, también conocidos como caudalímetros intrusivos o en el interior del fluido, o como caudalímetros de abrazadera, también conocidos como caudalímetros no intrusivos. Otras formas de caudalímetros incluyen canales Venturi, superficies de rebose, caudalímetros de radar, caudalímetros de Coriolis, caudalímetros de presión diferencial, caudalímetros inductivos magnéticos y otros tipos de caudalímetros.

Cuando existen perfiles de flujo irregular o canales abiertos, puede ser necesario más de un trayecto de propagación para determinar la velocidad media del flujo. Entre otros, los procedimientos de múltiples trayectos se describen en estándares de hidrometría, tales como IEC 41 o EN ISO 6416. Como aplicación adicional, los caudalímetros ultrasónicos se utilizan, asimismo, para medir perfiles de flujo, por ejemplo, con un perfilador de corriente de Doppler acústico (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler). El ADCP también es adecuado para medir la velocidad del agua y la descarga en ríos y aguas abiertas.

Es un objetivo de la presente memoria descriptiva dar a conocer un caudalímetro de tiempo de tránsito mejorado y un procedimiento correspondiente para medir una velocidad media del flujo o un perfil del flujo de un fluido, en general, y, en concreto, para líquidos tales como agua, aceite o para gases.

La Patente WO 2004/102499 da a conocer un caudalímetro de tiempo de desplazamiento en un aparato de detección de partículas que transmite una primera y una segunda señales, cada una con una funcionalidad de forma de onda característica, comprendiendo la segunda señal una modificación de la forma de onda. Las señales recibidas son superpuestas y se determina un punto de desvío. De este modo, se puede determinar un tiempo de llegada de una porción específica de una ráfaga de señal recibida.

La Patente WO 2013/164805 A1 da a conocer, en la figura 10, un caudalímetro de tiempo de desplazamiento que tiene pares de transductores introducidos en el fluido o en línea que están dispuestos en cinco planos acústicos diferentes.

La Patente WO 2014/016159 A1 da a conocer, en la figura 5, un procedimiento para medir una velocidad de flujo en un caudalímetro de tiempo de desplazamiento que utiliza una correlación cruzada entre una señal de referencia y una señal de eco 42 recibida.

En un dispositivo de medición de caudal según la presente memoria descriptiva, se utilizan transductores de sonido, por ejemplo, en forma de elementos piezoeléctricos, también conocidos como transductores piezoeléctricos, para generar y recibir una señal de ensayo y una señal de medición.

Los transmisores de sonido alternativos comprenden láseres que excitan una membrana de metal para que vibre, o simples altavoces. Asimismo, se pueden producir ondas de presión de otras maneras. El lado de recepción también puede ser representado por otros medios que son diferentes de los transductores piezoeléctricos, pero detectan ondas ultrasónicas.

Aunque el término “transductor piezoeléctrico” se utiliza a menudo en la presente descripción, también representa otros transductores de ondas de sonido que producen o detectan ondas ultrasónicas.

Una señal de medición según la presente memoria descriptiva puede ser modelizada mediante un filtro adaptado. Si se utiliza un impulso de pico agudo como una sonda o señal de ensayo, la señal recibida en el transductor es la respuesta al impulso de un conducto o canal del fluido. Según la presente solicitud, una versión invertida con respecto al tiempo de la respuesta al impulso es devuelta a través del mismo canal como señal de medición, ya sea en la dirección inversa o en la misma dirección. Esto se traduce en una señal con un pico en el origen, donde estaba la fuente original, o en una señal con un pico en el receptor original, respectivamente.

La inversión con respecto al tiempo se puede conseguir de varias maneras. Si se utilizan medios analógicos para registrar la señal de respuesta, se podría reproducir la señal de respuesta registrada, en modo inverso. Si se utilizan medios digitales para registrar muestras de la señal de respuesta, entonces, el orden de las muestras registradas se invierte para obtener la señal invertida. Esto se puede conseguir invirtiendo los valores de las marcas de tiempo de cada muestra registrada, multiplicando el valor de tiempo respectivo por (-1). Si es reproducida según un orden ascendente de los valores de la marca de tiempo, las muestras registradas son reproducidas en orden inverso. En otras palabras, la señal de respuesta invertida es la señal de respuesta registrada, pero reproducida en sentido inverso.

Un caudalímetro ultrasónico según la presente memoria descriptiva proporciona una propiedad de enfoque utilizando la señal invertida mencionada anteriormente, o una señal de forma similar, para que un caudalímetro ultrasónico forme una señal de respuesta, que esté concentrada tanto en el espacio como en el tiempo. Esto, a su vez, conduce a una mayor amplitud en un elemento piezoeléctrico de recepción y a una mejor relación de señal a ruido.

Con un caudalímetro ultrasónico según la presente memoria descriptiva, el enfoque se puede obtener bajo condiciones muy generales. Por ejemplo, se obtiene una propiedad de enfoque incluso cuando solo se excita un transmisor de ultrasonidos e incluso cuando la señal invertida se reduce a una señal que solo se digitaliza de manera aproximada en el rango de amplitud, si la resolución en el tiempo de la señal invertida es suficiente. Además, un caudalímetro según la presente memoria descriptiva se puede utilizar con transductores de abrazadera, que son fáciles de colocar en una tubería y no requieren modificaciones de la tubería.

En un procedimiento de medición de caudal según la presente memoria descriptiva, la resolución de bits puede ajustarse con respecto a la amplitud de la señal de medición. En concreto, la resolución de bits puede ajustarse para obtener una amplitud grande de una señal de respuesta.

Según una realización, la resolución de bits se aumenta para aumentar la amplitud de una señal de respuesta de la señal de medición. En una realización, la resolución de bits es incrementada en escalones predeterminados, se selecciona la resolución de bits que produce la señal de respuesta con la amplitud más alta y se almacena una representación correspondiente de una señal de medición en la memoria del ordenador.

Según otra realización, la resolución de bits se reduce para aumentar la amplitud de una señal de respuesta de la señal de medición. En una realización, la resolución de bits es reducida en escalones predeterminados, se selecciona la resolución de bits que produce la señal de respuesta con la amplitud más alta y la representación correspondiente de una señal de medición es almacenada en la memoria del ordenador.

En concreto, la resolución de bits puede ser una resolución de bits baja, tal como una resolución que está almacenada en un dígito o en dos dígitos, en concreto, en uno o dos dígitos binarios. Según otras realizaciones, la resolución de bits baja comprende, como mínimo, una resolución de 1 bit y como máximo una resolución de 64 bits.

Según otra realización, la primera señal de respuesta es procesada para determinar u obtener un cambio en el grosor de la pared del conducto o para determinar u obtener las características del material de la pared del conducto determinando las características de la onda de sonido longitudinal y transversal. Por ejemplo, las características de las ondas transversales y longitudinales pueden ser obtenidas a partir de las porciones correspondientes de la señal de recepción o respuesta, que corresponde a diferentes tiempos de llegada de las ondas acústicas.

Según esta realización, se utiliza la misma señal de respuesta para la determinación de la velocidad de flujo y para la detección de las propiedades mencionadas anteriormente. Por lo tanto, ya no es necesario utilizar una señal separada o una disposición separada para detectar efectos tales como contaminaciones y defectos del material, aunque se puede utilizar una señal separada o una disposición separada. Además, las propiedades del canal obtenidas pueden ser utilizadas para obtener una estimación más precisa de la velocidad del flujo.

En un caudalímetro ultrasónico según la presente memoria descriptiva, las características técnicas que garantizan un buen acoplamiento y direccionalidad de los transductores de abrazadera y para reducir la dispersión pueden no ser necesarias o, por el contrario, incluso pueden mejorar el enfoque. Con el fin de proporcionar una mayor dispersión, se puede seleccionar un material de acoplamiento que se adapte a un índice de refracción del líquido o se pueden utilizar transductores o acoplamientos de transductor que proporcionen más ondas de cizalladura.

Preferentemente, la frecuencia de las ondas sonoras que se utilizan en un caudalímetro según la memoria descriptiva está comprendida entre >20 kHz y 2 MHz, lo que corresponde a un período de oscilación de 0,5 microsegundos (μs), pero incluso puede ser de hasta 800 MHz. En muchos casos, los caudalímetros ultrasónicos funcionan muy por encima del umbral de audición con frecuencias de varios cientos de kHz o superiores. La frecuencia de los caudalímetros ultrasónicos de tiempo de tránsito está habitualmente en el rango de kHz o MHz.

Según un aspecto, la presente memoria descriptiva da a conocer un procedimiento implementado por ordenador para determinar la velocidad de flujo de un fluido en un conducto o canal de fluido utilizando un caudalímetro ultrasónico de tiempo de transmisión. En concreto, el procedimiento puede ser utilizado para una tubería o tubo,

pero también para aplicaciones de canal abierto, tales como aplicaciones para drenaje o canales de riego. En una realización preferente, “implementado por un ordenador” hace referencia a una ejecución en componentes electrónicos a pequeña escala, tales como microprocesadores, ASIC, FPGA y similares, que pueden ser utilizados en dispositivos de procesamiento de señales digitales compactos estacionarios o portátiles que, en general, son de un tamaño más pequeño que las estaciones de trabajo o los ordenadores centrales y que pueden ser colocados en una ubicación requerida a lo largo de una tubería de fluido.

En lo siguiente, los términos “canal”, “conducto”, “paso”, “tubería”, etc. se utilizan como sinónimos. La materia de la solicitud puede ser aplicada a todos los tipos de conductos para fluidos, independientemente de su forma respectiva e independientemente de si son abiertos o cerrados, o llenos o parcialmente llenos. La materia de la solicitud puede ser aplicada, asimismo, a todo tipo de fluidos o gases, ya sean gases o líquidos, o a una mezcla de ambos.

Durante una fase de generación de la señal de medición, el conducto de fluido está provisto de un fluido a una velocidad predeterminada con respecto al conducto de fluido, especialmente un fluido que está esencialmente en reposo con respecto al conducto de fluido. La señal de medición es generada a partir de una señal de respuesta, que el canal de transmisión genera en respuesta a una señal de impulso aplicada inicialmente.

Una señal de impulso es aplicada a un primer transductor ultrasónico, tal como un transductor piezoeléctrico, en el que una señal de impulso hace referencia a una señal que tiene una energía de señal que se concentra en un corto período de tiempo, en concreto. En una realización específica, la señal de impulso se extiende a lo largo de unos cuantos períodos de oscilación de una portadora, tal como entre 10 y 20 períodos de oscilaciones, o menos. En concreto, una envolvente de la señal de impulso puede tener una forma rectangular, pero también son posibles otras formas. Por ejemplo, la señal de impulso puede corresponder a un pico único o a un impulso simple, a una ráfaga rectangular corta o a cualquier otra forma de señal, tal como una forma de diente de sierra, una onda rectangular, una onda *chirp*, una onda sinusoidal o una ráfaga de ruido predeterminada, tal como un ruido blanco o rosa, que también se conoce como ruido 1/f. El procedimiento funciona casi con cualquier forma de señal de la señal de impulso.

La fase de generación de la señal no necesita ser repetida para cada medición. Por ejemplo, puede ser llevada a cabo antes de una primera medición y, en momentos posteriores, cuando cambian las condiciones en el conducto de fluido, por ejemplo, debido a sedimentos, corrosiones y estrés térmico.

En ocasiones, el término “fase de calibración” es utilizado cuando hace referencia a la fase de generación de la señal de medición. Esto no es del todo correcto. Para caudalímetros, es habitual que el caudalímetro sea colocado en una plataforma de calibración en la que se comparan los valores medidos y los valores objetivos para los caudales. El factor de enlace entre estos dos valores se denomina factor de calibración, e incorpora errores de hardware y software de la medición de flujo que no pueden ser especificados. Para la materia de la solicitud es más apropiado discernir entre la fase de generación de la señal de medición y la fase de calibración. La fase de generación de la señal de medición proporciona una señal de medición que, cuando es utilizada, entrega un pico relativamente agudo en la señal de respuesta a la señal de medición, mientras que la fase de calibración proporciona un caudalímetro que proporciona una medición precisa del caudal.

Las siguientes etapas del procedimiento según la memoria descriptiva:

- proporcionar una señal de impulso a un primer transductor ultrasónico, estando ubicado el primer transductor ultrasónico en el conducto de fluido en una primera ubicación,
- proporcionar una señal de respuesta de la señal de impulso en un segundo transductor ultrasónico, estando ubicado el segundo transductor ultrasónico en el conducto de fluido en una segunda ubicación,
- obtener una señal de medición a partir de la señal de respuesta, comprendiendo la obtención de la señal de medición seleccionar una porción de señal de la señal de respuesta o de una señal obtenida a partir de la misma e invertir la porción de señal con respecto al tiempo,

pueden ser proporcionadas aplicando y midiendo señales actualizadas reales a un conducto real. Resultó que las etapas de proporcionar una señal de respuesta de la señal de impulso en un segundo transductor ultrasónico y de obtener una señal de medición pueden ser obtenidas mediante una simulación numérica o analógica, una vez que la señal de impulso se proporciona como una señal digital o analógica. Para este propósito, se puede utilizar un software de elementos finitos.

Los transductores piezoeléctricos están ubicados en el conducto de fluido. En concreto, pueden estar situados, respectivamente, montados en el conducto de fluido. El primer transductor piezoeléctrico está ubicado respectivamente montado en un perímetro del conducto de fluido en una primera ubicación. En una realización concreta, está sujeto al perímetro del conducto de fluido. Una señal de respuesta de la señal de impulso es recibida en un segundo transductor piezoeléctrico.

El segundo transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, está ubicado respectivamente montado en el conducto de fluido en una segunda ubicación, que está desplazada a lo largo de una dirección longitudinal del

conducto de fluido con respecto a la primera ubicación y a lo largo de una sección transversal que atraviesa el centro del eje del conducto, en el que la dirección longitudinal corresponde a una dirección de flujo promedio a través del canal. El conducto de fluido puede ser llenado completamente con el fluido si no se desean reflexiones en la superficie del fluido y otros efectos.

Una señal de medición es obtenida a partir de la señal de respuesta, que es una respuesta del canal de transmisión a una señal de impulso inicial, con medios analógicos o también de manera digital. La obtención de la señal de medición comprende seleccionar una porción de señal de la señal de respuesta o de una señal obtenida a partir de la misma, e invertir la porción de señal con respecto al tiempo, y puede comprender la etapa de almacenar la señal de medición, por ejemplo, en su forma digitalizada en una memoria legible por ordenador para su utilización posterior. En este caso, son posibles diferentes secuencias de las etapas del procedimiento. Por ejemplo, la señal puede ser invertida en el tiempo después de almacenarla.

Durante una fase de medición, en la que el fluido se mueve con respecto al conducto de fluido según condiciones externas tales como presión, gravedad, inclinación de la tubería, etc., la señal de medición es aplicada a uno del primer y segundo transductores ultrasónicos, tal como los transductores piezoeléctricos. Más concretamente, una señal eléctrica, que puede ser obtenida a partir de una señal de medición almacenada, puede ser aplicada al transductor.

Una primera señal de respuesta de la señal de medición es medida en el otro transductor ultrasónico, tal como un transductor piezoeléctrico, una velocidad de flujo del fluido es obtenida a partir, como mínimo, de la primera señal de respuesta. En concreto, esto comprende medir un tiempo de vuelo aguas abajo o aguas arriba. Se puede obtener una estimación de la velocidad comparando el tiempo de vuelo medido con un tiempo de vuelo bajo calibración, teniendo en cuenta la velocidad del sonido en las condiciones actuales, por ejemplo, midiendo la temperatura del fluido. En etapas adicionales, un flujo volumétrico o un flujo másico pueden ser obtenidos a partir de la velocidad de flujo o de un perfil de velocidad de flujo.

Para obtener una estimación más precisa, se pueden realizar mediciones en ambos sentidos, desde el primero al segundo transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico y en sentido inverso. En concreto, esto permite eliminar la velocidad del sonido en una medición de tiempo de vuelo o puede proporcionar una estimación fiable de la velocidad actual del sonido.

Una medición de flujo según la presente memoria descriptiva puede ser utilizada en disposiciones con solo dos transductores y también en disposiciones de múltiples transductores, tales como las disposiciones de las figuras 43 y 44 o la disposición de las figuras 4 y 5. En concreto, la medición del flujo puede ser obtenida mediante un par de transductores de una disposición de múltiples transductores, que están dispuestos uno frente al otro. El par de transductores puede estar dispuesto en un plano a través de un eje central del conducto, tal como se muestra en la figura 43, o pueden estar dispuestos en un plano que está desplazado con respecto al eje central del conducto, tal como se muestra en la figura 44. La disposición de la figura 44 puede ser utilizada para determinar la velocidad del fluido en una capa de fluido a una distancia predeterminada del eje central.

En consecuencia, las etapas de aplicar la señal de medición y medir la señal de respuesta son repetidas en sentido inverso. En otras palabras, el receptor anterior se utiliza como emisor, y el emisor anterior se utiliza como receptor y se envía una señal desde el otro transductor ultrasónico respectivo, tal como el transductor piezoeléctrico al respectivo primero de los dos transductores, para obtener una segunda señal de respuesta. La velocidad de flujo del fluido es obtenida a partir de la primera señal de respuesta y la segunda señal de respuesta. En concreto, la obtención comprende obtener un tiempo de vuelo aguas abajo y aguas arriba.

Aunque se puede enviar una señal de medición desde un transductor ultrasónico, tal como un transductor piezoeléctrico, a otro transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, también es beneficioso ejecutar esto hacia adelante y en sentido inverso cuando se realiza una medición de velocidad o flujo.

En otras palabras, el procedimiento puede ser realizado de la siguiente manera.

Sentido hacia adelante:

- enviar una señal de impulso desde un primer transductor ultrasónico a un segundo transductor ultrasónico,
- recibir una señal de respuesta de la señal de impulso en el segundo transductor ultrasónico,
- invertir con respecto al tiempo la señal de respuesta recibida en el segundo transductor ultrasónico, obteniendo de este modo una señal de medición,
- enviar la señal de medición del primer transductor ultrasónico al segundo transductor ultrasónico,
- recibir una señal de respuesta de la señal de medición en el segundo transductor ultrasónico.

Sentido inverso:

- enviar una señal de impulso del segundo transductor ultrasónico al primer transductor ultrasónico, tal como el

transductor piezoeléctrico,
- recibir una señal de respuesta de la señal de impulso en el primer transductor ultrasónico,
- invertir con respecto al tiempo la señal de respuesta recibida de la señal de impulso del primer transductor ultrasónico, obteniendo de este modo una señal de medición,
- enviar la señal de medición del segundo transductor ultrasónico al primer transductor ultrasónico,
- recibir una señal de respuesta a la señal de medición en el primer transductor ultrasónico,
- medir la diferencia de tiempo entre la recepción de señales de respuesta en el segundo transductor ultrasónico y el primer transductor ultrasónico. Esta diferencia de tiempo es proporcional a la velocidad de flujo entre los dos transductores ultrasónicos, tal como los transductores piezoeléctricos.

Se debe observar que la señal de medición para el sentido hacia adelante puede ser diferente de la señal de medición para el sentido inverso. La señal de medición suele tener una forma única para cada sentido de propagación, aunque para configuraciones simples se pueden utilizar señales de medición idénticas.

En toda la solicitud, a menudo se utiliza el término “ordenador”. Aunque un ordenador incluye dispositivos tales como un ordenador portátil o un ordenador de escritorio, la transmisión y recepción de la señal también pueden ser realizadas mediante microcontroladores, ACID, FPGA, etc.

Además, una línea de conexión prevista entre los transductores puede estar desplazada geométricamente con respecto a un centro del conducto de fluido para obtener una velocidad de flujo en una capa predeterminada, y puede haber más de un par de transductores. Además, la señal de medición puede ser proporcionada por más de un transductor y/o la señal de respuesta a la señal de medición puede ser medida por más de un transductor.

Según una realización simple, se genera una señal de medición promedio mediante una superposición lineal de las señales de respuesta de la multitud de transductores receptores y las etapas de procesamiento de señal mencionadas anteriormente se realizan en la señal de respuesta promedio para obtener una señal de medición.

Según otra realización más, hay un número igual, digamos N, de transductores de envío y recepción, en la que las ubicaciones relativas de los transductores de envío son iguales a las ubicaciones relativas de los transductores de recepción. Las N señales de respuesta recibidas son procesadas a continuación de manera individual según las etapas de procesamiento de señal mencionadas anteriormente para obtener N señales de medición individuales.

Estos N transductores están dispuestos habitualmente, por ejemplo, como transductores de abrazadera, transductores de inserción o de montaje interno. A modo de ejemplo, la figura 43 muestra una disposición con 8 transductores de abrazadera, y la figura 44 muestra una disposición con 8 transductores de inserción. Los 8 transductores de la figura 43 están dispuestos en cuatro planos respectivos, que atraviesan el centro del eje del conducto.

Los 8 transductores de inserción de la figura 44 están dispuestos en cuatro planos paralelos.

Las líneas de conexión entre los transductores muestran un modo de funcionamiento de los transductores. En el modo de funcionamiento de la figura 43, las señales son enviadas de un primer transductor a un segundo transductor que es opuesto al primer transductor con respecto a un punto central en el eje central del conducto de agua.

En el modo de funcionamiento de la figura 44, las señales son enviadas de un primer transductor a un segundo transductor con respecto a un punto central, que se encuentra en el centro de la disposición rectangular respectiva y en uno de los cuatro planos paralelos.

Según una realización, la parte de señal de la señal de respuesta que se utiliza para obtener la señal de medición comprende una primera parte alrededor de una amplitud máxima de la señal de respuesta y una porción posterior de señal, extendiéndose la porción posterior de señal en el tiempo detrás del tiempo de llegada de la amplitud máxima. La porción posterior proporciona señales de reflexiones adicionales aparte de las señales cercanas a la señal directa, y puede contribuir a un mejor enfoque.

Para obtener una señal de medición generada mejorada, las etapas de aplicar una señal de impulso y recibir una señal de respuesta correspondiente no solo se pueden hacer una vez, sino que se pueden repetir varias veces, como mínimo dos veces. De este modo, se obtiene una pluralidad de señales de respuesta. Una señal de medición es obtenida a partir de un promedio de las señales de respuesta recibidas.

En una realización, las mediciones se repiten varias veces, pero con la señal ultrasónica desplazándose solo en un sentido. En otra realización, las mediciones se repiten varias veces, desplazándose la señal ultrasónica en ambos sentidos. En otra realización más, las mediciones se repiten múltiples veces en ambos sentidos y se obtienen promedios separados para ambos sentidos.

Según otra realización, la obtención de una señal de medición a partir de una o varias señales de respuesta

recibidas comprende determinar una envolvente de la señal de respuesta o de una señal obtenida a partir de la misma. Se proporciona una señal oscilante modulada en amplitud que se modula en amplitud según la envolvente. Utilizar una envolvente en lugar de muestras, o además de esto, puede proporcionar beneficios en términos de espacio de almacenamiento y de velocidad de cálculo.

En concreto, la amplitud de modulación puede tener la forma de la envolvente determinada para la señal de medición o para una porción de la misma. La frecuencia de oscilación de una portadora es, como mínimo, de 20 kHz. Según otras realizaciones, la frecuencia es, como mínimo, de 100 kHz, como mínimo, de 500 kHz o, como mínimo, de 1 MHz. La elección de la frecuencia afecta al proceso de dispersión, y una frecuencia más alta puede proporcionar un muestreo más fino de una pared del conducto, lo que, a su vez, puede permitir una conformación más precisa de la señal ultrasónica.

Según otras realizaciones, la señal de respuesta o una señal obtenida a partir de la misma es digitalizada con respecto a la amplitud y, especialmente, con una resolución entre 1 y 8 bits. La presente memoria descriptiva muestra que incluso una digitalización aproximada con respecto a la amplitud puede conducir a un enfoque suficiente de la señal ultrasónica. Utilizar una baja resolución ahorra tiempo de cálculo y espacio de memoria, mientras que las resoluciones más altas no necesariamente proporcionan un resultado de medición más preciso del caudal de fluido a través del conducto. También resultó que aumentar o disminuir la resolución de la señal de respuesta o la señal de medición puede ayudar a mejorar la relación de señal a ruido y la precisión de la medición del tiempo. La reducción de la resolución da como resultado un pico más agudo o más característico en la respuesta a la señal de medición. Esto significa que, si se produce una SNR alta, se podría disminuir la resolución de la señal de medición o la señal de respuesta de la señal de medición, en lugar de aumentar la potencia de transmisión de la señal de medición.

Según otro aspecto de la presente memoria descriptiva, algunos procedimientos para determinar la velocidad de flujo de un fluido en un conducto o tubería de fluido pueden utilizar una señal de medición de amplitud modulada o una señal de respuesta de amplitud modulada de un caudalímetro ultrasónico de tiempo de transmisión. Este procedimiento no implica necesariamente una etapa de fase de generación de la señal, aunque se puede utilizar una única etapa de fase de generación de la señal para obtener una señal de medición. Por ejemplo, el procedimiento puede estar basado en una señal de medición previamente generada en una fábrica, en el que la señal de medición se genera como una señal de recepción invertida en el tiempo de un transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, que ha recibido una serie de oscilaciones enviadas por otro transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico.

En una primera etapa, el conducto de fluido está dispuesto con el fluido, que se mueve con respecto al conducto de fluido según condiciones externas tales como presión, gravedad, inclinación de la tubería, etc.

Un primer transductor piezoeléctrico está dispuesto en una primera ubicación del conducto de fluido. Un segundo transductor ultrasónico, tal como un transductor piezoeléctrico, está dispuesto en una segunda ubicación del conducto de fluido. La segunda ubicación está desplazada a lo largo de una dirección longitudinal del conducto de fluido con respecto a la primera ubicación, y la dirección longitudinal corresponde a una dirección de flujo de fluido del canal de fluido.

Se proporciona una señal de medición y se aplica en el primer o el segundo transductor ultrasónico, tal como los transductores piezoeléctricos. Más concretamente, una señal eléctrica que se obtiene a partir de una señal de amplitud modulada que puede ser enviada al transductor.

Una primera señal de respuesta de la señal de medición es medida en el otro transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, y la velocidad de flujo del fluido es obtenida a partir de la primera señal de respuesta. En concreto, esto comprende obtener un tiempo de vuelo aguas abajo o aguas arriba.

De manera similar al procedimiento mencionado anteriormente, se puede conseguir una mayor precisión repitiendo la medición en sentido inverso para obtener un tiempo de vuelo aguas abajo y aguas arriba. Tal como se muestra en las figuras 43 y 44, se pueden utilizar N pares de transductores, por ejemplo, para obtener una estimación más precisa del flujo promedio o para obtener una estimación del flujo en un plano a una distancia predeterminada del eje central del conducto de líquido.

En concreto, las etapas de aplicar la señal de medición y medir la señal de respuesta son repetidas en sentido inverso para obtener una segunda señal de respuesta, y una velocidad de flujo del fluido es obtenida a partir de la primera señal de respuesta y de la segunda señal de respuesta, en las que la obtención comprende obtener un tiempo de vuelo aguas abajo y aguas arriba.

Estas etapas son muy similares a las etapas del procedimiento descritas anteriormente, con la diferencia de que las mediciones se realizan sin ajustar el dispositivo antes de cada medición.

Las siguientes características son aplicadas a ambos procedimientos, con o sin fase de generación de señal antes

de cada medición.

Según otra realización, una amplitud de la señal de medición o una amplitud de la señal de respuesta puede aumentar a una amplitud máxima en un número predeterminado de oscilaciones, por ejemplo, cinco o más períodos de oscilación de la señal portadora. Cuando la amplitud aumenta durante un período de tiempo, se puede reducir el efecto de la inercia de un tiempo de reacción de los transductores ultrasónicos, tales como los transductores piezoeléctricos, sobre la medición.

En una realización concreta, la señal de medición o la señal de respuesta aumenta exponencialmente hasta una amplitud máxima durante, como mínimo, cinco períodos de oscilación de la señal portadora. Según otra realización, la señal de medición comprende una porción delantera, extendiéndose la porción delantera en el tiempo a lo largo de varios medios anchos de un máximo de señal de la señal de medición, y la parte delantera precede, como mínimo, a una región de medio ancho del máximo de señal en el tiempo.

Según otra realización más, la señal de medición comprende una porción delantera. La porción delantera es obtenida a partir de una porción posterior de una señal recibida, que sucede a un máximo de señal de la señal recibida con respecto al tiempo. La parte delantera se extiende sobre, como mínimo, tres veces la mitad del ancho alrededor del máximo de señal de las señales recibidas.

Según otras realizaciones, la porción delantera comprende, como mínimo, un 10 % o, como mínimo, un 50 %, de la energía de señal de la señal de medición.

Una energía E de señal de una señal s(t) en un intervalo de tiempo se puede definir en términos de la expresión $\mathrm{E} = \int_{T1}^{T2} dt\, |s(t)|^2$ o su versión discreta $\mathrm{E} = \sum_{i=-m}^{n} |s(i)|^2$, en la que el intervalo de tiempo viene dado por [T1, T2] o [-m*Δt, n*Δt], respectivamente.

La porción delantera de la señal de medición puede contribuir significativamente a la producción de una señal que alcanza su punto máximo en el espacio y el tiempo.

En algunas realizaciones específicas, la señal de medición o la señal de respuesta puede ser proporcionada mediante una señal oscilante de amplitud modulada, que es digitalizada con respecto a la amplitud, por ejemplo, con una resolución entre 1 y 8 bits. Esto puede proporcionar beneficios en términos de velocidad de cálculo y espacio de memoria e, incluso, puede conducir a un pico de señal aumentado. Según otra realización, la señal de medición que es aplicada a un transductor puede comprender una señal oscilante que es modulada según una modulación 0-1 que proporciona una amplitud predeterminada o ninguna amplitud, o, en otras palabras, una amplitud cero.

En concreto, la señal de medición modulada en amplitud puede ser obtenida a partir de una señal de respuesta medida según una fase de generación de señal en la que el conducto de fluido está provisto de un fluido que tiene una velocidad predeterminada o está esencialmente en reposo con respecto al conducto de fluidos.

Se aplica una señal de impulso al primer transductor ultrasónico, tal como un transductor piezoeléctrico, y se recibe una señal de respuesta de la señal de impulso en un segundo transductor ultrasónico, tal como un transductor piezoeléctrico.

La señal de medición es obtenida a partir de la señal de respuesta. La obtención de la señal de medición comprende seleccionar una porción de señal de la señal de respuesta o de una señal obtenida a partir de la misma e invertir la porción de señal con respecto al tiempo, y una señal de medición digitalizada puede ser almacenada en una memoria legible por ordenador para su utilización posterior.

En una realización concreta, una amplitud de una envolvente de la señal de medición o de una señal de respuesta puede aumentar, como mínimo, en un orden de magnitud desde una porción delantera de señal de la señal de medición hasta una amplitud máxima. La porción delantera de la señal precede al máximo de la señal en el tiempo. En otras palabras, es enviada antes. Según otras realizaciones, la amplitud aumenta, como mínimo, en dos, o incluso, como mínimo, en tres órdenes de magnitud.

Según otro aspecto, se da a conocer un dispositivo para medir una velocidad de flujo en un caudalímetro ultrasónico de tiempo de desplazamiento. El dispositivo comprende un primer conector, para conectar un primer elemento piezoeléctrico, un segundo conector, para conectar un segundo elemento piezoeléctrico, un convertidor de digital a analógico (DAC, Digital to Analog Converter) opcional, que está conectado al primer conector, y un convertidor de analógico a digital (ADC, Analog to Digital Converter) opcional, que está conectado al segundo conector.

Además, el dispositivo comprende una memoria legible por ordenador, un temporizador u oscilador electrónico, una unidad de transmisión, para enviar una señal de impulso al primer conector, y una unidad de recepción, para recibir una señal de respuesta de la señal de impulso desde el segundo conector.

Además, el dispositivo comprende medios para generar la señal de medición a partir de una señal de respuesta recibida, tal como una unidad de selección, para seleccionar una porción de la señal de respuesta recibida o una señal obtenida a partir de la misma, y una unidad de inversión, para invertir la porción seleccionada de la señal de respuesta, con respecto al tiempo, para obtener una señal invertida. Opcionalmente, se puede disponer un filtro de paso de banda para eliminar componentes de señal no deseados. Además, una unidad de procesamiento está dispuesta para obtener una señal de medición, como mínimo, a partir de la señal invertida, y para almacenar la señal de medición en la memoria legible por ordenador.

Además, el dispositivo comprende medios para medir una velocidad de flujo. Un generador de la señal de medición, que puede ser conectado al primer conector o al segundo conector, y un medio de transmisión, tal como el DAC y los conectores, para enviar la señal de medición al primer conector, están dispuestos en el lado de envío. Una unidad de recepción para recibir una señal de respuesta de la señal de medición desde el segundo conector y una unidad de procesamiento de velocidad para obtener una velocidad de flujo a partir de la señal de respuesta recibida están dispuestas en el lado de recepción. Los términos velocidad de flujo y velocidad del flujo se utilizan como sinónimos en la presente solicitud.

Aunque el dispositivo se puede proporcionar como un dispositivo analógico sin convertidores A/D y D/A y sin una unidad de memoria legible por ordenador, también es posible proporcionar el dispositivo o partes de él con un sistema informático digital.

En concreto, las diversas unidades de procesamiento de señales, tales como la unidad de procesamiento de velocidad, la unidad de selección y la unidad de inversión pueden ser proporcionadas total o parcialmente por un componente electrónico específico de la aplicación o por una memoria de programa con un conjunto de instrucciones legibles por ordenador. De manera similar, el generador de la señal de medición y un generador de la señal de impulso de la unidad de transmisión pueden ser proporcionados, total o parcialmente, por un componente electrónico específico de la aplicación que puede comprender un conjunto de instrucciones legibles por ordenador.

Según otra realización, el dispositivo comprende un sintetizador digital directo de señal (DDS, Direct Digital Sinthesizer) que comprende el ADC mencionado anteriormente. El DDS comprende un registro de control de frecuencia, un oscilador de referencia, un oscilador de control numérico y un filtro de paso bajo de reconstrucción. Además, el ADC puede ser conectado al primer y al segundo conector sobre el filtro de paso bajo de reconstrucción.

Entre otros, el sintetizador de señal digital puede ser configurado para sintetizar una señal, tal como la señal de medición, mediante la utilización de un algoritmo predeterminado o de valores predeterminados que son almacenados en una unidad de memoria con una memoria legible por ordenador. Por ejemplo, la señal puede ser generada mediante la generación de señal directa o mediante DDS (síntesis digital directa).

Además, la presente memoria descriptiva da a conocer un dispositivo de medición de flujo con un primer transductor piezoeléctrico que está conectado al primer conector, y con un segundo transductor ultrasónico, tal como un transductor piezoeléctrico, que está conectado al segundo conector. En concreto, los transductores ultrasónicos, tales como los transductores piezoeléctricos, pueden estar provistos de zonas de unión, tales como un mecanismo de abrazadera para unirlos a una tubería.

Además, la presente memoria descriptiva da a conocer un dispositivo de medición de flujo con una porción de tubería. El primer transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, está montado en la porción de tubería en una primera ubicación y el segundo transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, está montado en la porción de tubería en una segunda ubicación. En concreto, los transductores pueden estar sujetos a la porción de tubería. Que el dispositivo disponga de una porción de tubería puede proporcionar beneficios cuando el dispositivo es calibrado previamente con respecto a la porción de tubería.

El dispositivo puede ser fabricado compacto y portátil. Un dispositivo portátil según la presente memoria descriptiva, que está equipado con transductores de montaje en superficie, tales como los transductores de abrazadera, puede ser utilizado para verificar una tubería en cualquier ubicación accesible. En general, el dispositivo puede ser estacionario o portátil. Preferentemente, el dispositivo es suficientemente compacto para ser colocado en un lugar requerido y suficientemente protegido contra las condiciones ambientales, tales como humedad, calor y sustancias corrosivas.

Además, la presente memoria descriptiva da a conocer un código legible por ordenador para ejecutar un procedimiento de medición de flujo según la presente memoria descriptiva, comprendiendo una memoria legible por ordenador el código legible por ordenador y un componente electrónico específico de la aplicación, que es accionable para ejecutar las etapas del procedimiento de un procedimiento según la presente memoria descriptiva.

En concreto, el componente electrónico específico de la aplicación puede ser proporcionado por un componente electrónico que comprende la memoria legible por ordenador mencionada anteriormente, tal como una EPROM, una EEPROM, una memoria flash o similar. Según otras realizaciones, el componente electrónico específico de la aplicación es proporcionado por un componente con un cableado fijo o con un circuito configurable, tal como un

circuito integrado específico de la aplicación (ASIC, Application Specific Integrated Circuit) o una matriz de puertas programables en campo (FPGA, Field Programmable Gate Array).

En otra realización, un componente electrónico específico de la aplicación según la presente memoria descriptiva es proporcionado por una pluralidad de componentes electrónicos interconectados, por ejemplo, por una FPGA, que está conectada a una EPROM programada adecuadamente en una disposición de múltiples matrices. Otros ejemplos de un componente electrónico específico de la aplicación son los circuitos integrados programables, tales como las matrices lógicas programables (PLA, Programmable Logic Arrays) y los dispositivos lógicos programables complejos (CPLD, Complex Programmable Logic Devices).

Es útil determinar si un dispositivo de ensayo estándar está midiendo la velocidad de flujo de un fluido en un conducto de fluido según la presente solicitud. Para este fin, se proporciona al conducto de fluido un fluido que tiene una velocidad predeterminada con respecto al conducto de fluido. Una señal de impulso de ensayo es aplicada a un primer transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico del dispositivo de ensayo, estando montado el primer transductor piezoeléctrico en el conducto de fluido en una primera ubicación, seguido de recibir una señal de ensayo de respuesta de la señal de ensayo de impulso en un segundo transductor piezoeléctrico del dispositivo de ensayo, estando montado el segundo transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, en el conducto de fluido en una segunda ubicación.

Una señal de medición de ensayo es obtenida, a continuación, a partir de la señal de respuesta, comprendiendo la obtención de la señal de medición de ensayo invertir la señal con respecto al tiempo, seguido de comparar la señal de medición de ensayo con una señal de medición que es emitida en el otro del primer y segundo transductores ultrasónicos, tal como el transductor piezoeléctrico. La señal de medición es una señal que es proporcionada por el dispositivo de ensayo cuando es suministrada por el fabricante, en base a una señal de medición de fábrica generada una sola vez después de fabricar el dispositivo de ensayo, a menudo montado en un fragmento de tubo.

En un caso en el que el dispositivo de ensayo está utilizando un procedimiento para determinar la velocidad de flujo de un fluido en un conducto de fluido según la solicitud, la señal de medición de ensayo y la señal de medición son similares. En otras palabras, la ingeniería inversa de la materia de la solicitud se proporciona eligiendo una señal de ensayo y repitiendo la fase de generación de la señal de la solicitud hasta que la señal de medición de ensayo y la señal de medición sean similares. El término “similar” significa que existe una correlación significativa entre la señal de medición de ensayo y la señal de medición.

El procedimiento puede comprender, asimismo, seleccionar una porción de señal de la señal de respuesta de ensayo o de una señal obtenida a partir de la misma, y almacenar la señal de medición de ensayo para una utilización posterior. En consecuencia, un dispositivo para medir una velocidad de flujo en un caudalímetro ultrasónico de tiempo de desplazamiento, tal como está definido por las características funcionales, comprende un primer conector, para un primer elemento piezoeléctrico, un segundo conector, para un segundo elemento piezoeléctrico, una unidad de transmisión, para enviar una señal de impulso al primer conector, una unidad de recepción, para recibir una señal de respuesta de la señal de impulso desde el segundo conector, una unidad de inversión, para invertir la señal de respuesta con respecto al tiempo para obtener una señal invertida, una unidad de procesamiento, para obtener una señal de medición a partir de la señal invertida. Cuando se utiliza el dispositivo para determinar la velocidad de flujo de un fluido en un conducto de fluido, se proporcionará al conducto de fluido un fluido que tenga una velocidad con respecto al conducto de fluido. A esto le sigue la aplicación de una señal de medición a uno del primer y segundo transductores ultrasónicos, tal como el transductor piezoeléctrico, y la medición de una primera señal de respuesta de la señal de medición en el otro del primer y segundo transductores ultrasónicos, tal como el transductor piezoeléctrico. A continuación, se puede obtener una velocidad de flujo del fluido a partir de la primera señal de respuesta. La ingeniería inversa del dispositivo dará a conocer que, cuando se aplica una señal de impulso de ensayo a un primer transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico del dispositivo de ensayo, se recibe una señal de respuesta de ensayo de la señal de impulso de ensayo en un segundo transductor piezoeléctrico del dispositivo de ensayo, estando montado el segundo transductor ultrasónico, tal como el transductor piezoeléctrico, en el conducto de fluido en una segunda ubicación, se obtiene una señal de medición de ensayo a partir de la señal de respuesta, comprendiendo la obtención de la señal de medición de ensayo invertir la señal con respecto al tiempo, en donde la señal de medición de ensayo y una señal de medición que es emitida en el primer o el segundo transductores ultrasónicos, tal como el transductor piezoeléctrico, son similares. Esta descripción funcional ayuda a caracterizar el dispositivo de la solicitud sin describir la estructura y la forma de las señales emitidas.

Es evidente que el dispositivo tiene un convertidor D/A, estando conectado el convertidor D/A al primer conector, un convertidor A/D, estando conectado el convertidor A/D al segundo conector, y una memoria legible por ordenador. El dispositivo según la invención comprende, además, una unidad de selección, para seleccionar una porción de la señal de respuesta recibida o una señal obtenida a partir de la misma, en el que las evaluaciones anteriores son realizadas con la porción seleccionada de la señal de respuesta recibida o una señal obtenida a partir de la misma.

La materia de la presente memoria descriptiva se explica a continuación con más detalle con respecto a las siguientes figuras, en las que

la figura 1 muestra una primera disposición del caudalímetro con dos elementos piezoeléctricos,
la figura 2 muestra la disposición del caudalímetro de la figura 1, una señal directa,
la figura 3 muestra la disposición del caudalímetro de la figura 1 vista en la dirección del flujo,
la figura 4 muestra una segunda disposición del caudalímetro con cuatro elementos piezoeléctricos y cuatro señales directas,
la figura 5 muestra la disposición del caudalímetro de la figura 4 vista en la dirección del flujo,
la figura 6 muestra un diagrama esquemático o una señal de ensayo,
la figura 7 muestra un diagrama esquemático de una respuesta de señal de ensayo,
la figura 8 muestra un diagrama esquemático de una señal invertida,
la figura 9 muestra un diagrama esquemático de una respuesta de la señal invertida,
la figura 10 muestra una primera señal invertida en alta resolución,
la figura 11 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 10,
la figura 12 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 13 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 12,
la figura 14 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 15 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 14,
la figura 16 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 17 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 16,
la figura 18 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 19 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 18,
la figura 20 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 21 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 20,
la figura 22 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 23 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 22,
la figura 24 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 25 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 24,
la figura 26 muestra otra señal invertida en alta resolución,
la figura 27 muestra una respuesta de la señal invertida de la figura 26,
la figura 28 muestra otra señal invertida en una resolución de 12 bits,
la figura 29 muestra una respuesta de la señal de la figura 28,
la figura 30 muestra otra señal invertida en resolución de 3 bits,
la figura 31 muestra una respuesta de la señal de la figura 30,
la figura 32 muestra otra señal invertida en resolución de 2 bits,
la figura 33 muestra una respuesta de la señal de la figura 32,
la figura 34 muestra otra señal invertida en resolución de 1 bit,
la figura 35 muestra una respuesta de la señal de la figura 34,
la figura 36 muestra un breve impulso en un elemento piezoeléctrico del caudalímetro de la figura 1,
la figura 37 muestra una señal de un elemento piezoeléctrico del caudalímetro de la figura 1, que es obtenida a partir de la respuesta invertida de la señal de la figura 36,
la figura 38 muestra una respuesta de la señal de la figura 37,
la figura 39 muestra una función de correlación cruzada aguas arriba y aguas abajo,
la figura 40 muestra una ampliación en sección de la figura 39,
la figura 41 muestra un dispositivo para medir una velocidad de flujo según la presente memoria descriptiva, y
la figura 42 muestra un sintetizador digital directo para ser utilizado en el dispositivo de la figura 41,
la figura 43 muestra una primera disposición de múltiples transductores, y
la figura 44 muestra una segunda disposición de múltiples transductores,
la figura 45 muestra una configuración Z de los transductores de abrazadera,
la figura 46 muestra una configuración V de los transductores de abrazadera,
la figura 47 muestra una configuración W de los transductores de abrazadera,
la figura 48 muestra una señal de envío de un ciclo,
la figura 49 muestra una señal de envío de diez ciclos,
la figura 50 muestra una señal de envío TRA,
la figura 51 muestra una señal de respuesta de la señal de envío de un ciclo de la figura 48,
la figura 52 muestra una señal de respuesta de la señal de envío de diez ciclos de la figura 49,
la figura 53 muestra una señal de respuesta de la señal de envío TRA de la figura 50,
la figura 54 muestra una curva de presión de una señal de envío TRA y una señal de respuesta de la señal de envío TRA,
la figura 55 muestra una curva de presión de una señal de envío TRA y una señal de respuesta de la señal de envío TRA,
la figura 56 muestra una señal de impulso que se utiliza para generar la entrada de señal de la figura 55,
la figura 57 muestra una primera señal de respuesta que indica las propiedades del canal,
la figura 58 muestra una segunda señal de respuesta que indica las propiedades del canal,
la figura 59 muestra otra señal de respuesta y
la figura 60 muestra otra señal de respuesta.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

En la siguiente descripción, se proporcionan detalles para describir las realizaciones de la presente memoria descriptiva. Será evidente para los expertos en la materia, no obstante, que las realizaciones pueden ser puestas en práctica sin dichos detalles.

La figura 1 muestra una primera disposición 10 del caudalímetro. En la disposición del caudalímetro, un primer elemento piezoeléctrico 11 está colocado en una pared exterior de una tubería 12, que se denomina, asimismo, tubo 12. Un segundo elemento piezoeléctrico 13 está colocado en un lado opuesto de la tubería 12, de tal manera que una línea directa entre el segundo elemento piezoeléctrico 11 y el elemento piezoeléctrico 13 aguas abajo está orientada en un ángulo β con respecto a la dirección 14 del flujo promedio, que es, asimismo, al mismo tiempo, la dirección del eje de simetría de la tubería 12. El ángulo β se elige para ser de aproximadamente 45 grados en el ejemplo de la figura 1, pero también puede ser mayor, tal como, por ejemplo, de 60 grados, o menor, tal como, por ejemplo, de 30 grados.

Un elemento piezoeléctrico, tal como los elementos piezoeléctricos 11, 13 de la figura 1, en general, puede funcionar como un transmisor acústico y como un sensor acústico. Un transmisor acústico y un sensor acústico pueden ser proporcionados por el mismo elemento piezoeléctrico o por diferentes regiones del mismo elemento piezoeléctrico. En este caso, un elemento piezoeléctrico o transductor también se conoce como un transmisor piezoeléctrico cuando funciona como transmisor o fuente de sonido y también se conoce como sensor acústico o receptor cuando funciona como sensor acústico.

Cuando un sentido del flujo es tal como se muestra en la figura 1, el primer elemento piezoeléctrico 11 se denomina, asimismo, elemento piezoeléctrico “aguas arriba” y el segundo elemento piezoeléctrico 13 se denomina, asimismo, elemento piezoeléctrico “aguas abajo”. Un caudalímetro según la presente memoria descriptiva funciona para ambos sentidos del flujo esencialmente de la misma manera y el sentido del flujo de la figura 1 solo se proporciona a modo de ejemplo.

La figura 1 muestra un flujo de señales eléctricas de la figura 1 para una configuración en la que el elemento piezoeléctrico aguas arriba 11 funciona como un transductor piezoeléctrico y el elemento piezoeléctrico aguas abajo 13 funciona como un sensor acústico. Para mayor claridad, la aplicación funciona aguas arriba y aguas abajo, es decir, la posición de los elementos piezoeléctricos puede ser intercambiada.

Una primera unidad de cálculo 15 está conectada al elemento piezoeléctrico aguas arriba 11 y una segunda unidad de cálculo 16 está conectada al elemento piezoeléctrico aguas abajo 13. La primera unidad de cálculo 15 comprende un primer procesador de señal digital, un primer convertidor de digital a analógico (DAC) y un primer convertidor de analógico a digital (ADC). Asimismo, la segunda unidad de cálculo 16 comprende un segundo procesador de señal digital, un segundo convertidor de digital a analógico (DAC) y un segundo convertidor de analógico a digital (ADC). La primera unidad de cálculo 15 está conectada a la segunda unidad de cálculo 16.

La disposición con dos unidades de cálculo 15, 16 mostradas en la figura 1 solo se proporciona a modo de ejemplo. Otras realizaciones pueden tener diferentes números y disposiciones de unidades de cálculo. Por ejemplo, puede haber solo una unidad central de cálculo o puede haber dos convertidores AD/DC y una unidad central de cálculo, o puede haber dos unidades de cálculo pequeñas en los transductores y una unidad central de cálculo más grande.

Una unidad de cálculo o varias unidades de cálculo pueden ser proporcionadas mediante microcontroladores o circuitos integrados de aplicación específica (ASIC), ACID o matrices de puertas programables en campo (FPGA), por ejemplo. Específicamente, la síntesis de una señal eléctrica a partir de una señal digital almacenada puede ser proporcionada por un sintetizador digital directo (DDS), que comprende un convertidor de digital a analógico (DA, DAC).

Un procedimiento para generar una señal de medición según la presente memoria descriptiva comprende las siguientes etapas.

Una señal de ensayo digital predeterminada es generada sintetizando una señal acústica con el procesador de señal digital de la primera unidad de cálculo 15. La señal de ensayo digital es enviada desde la primera unidad de cálculo 15 al transductor piezoeléctrico 11 a lo largo del trayecto de señal 17. El transductor piezoeléctrico 11 genera una señal de ensayo de ultrasonidos correspondiente. Las unidades 15 y 16 también pueden estar dispuestas en una sola unidad.

La señal de ensayo se proporciona como un pulso corto, por ejemplo, de una sola oscilación de 1 MHz o de 10 de dichas oscilaciones. En concreto, la señal de ensayo puede ser proporcionada mediante un pequeño número de oscilaciones con amplitud constante, aproximando de este modo una señal rectangular. La oscilación o las oscilaciones pueden tener una forma sinusoidal, una forma triangular, una forma rectangular o también otras formas.

La señal de ensayo de ultrasonidos se desplaza a través del líquido en la tubería 12 hasta el sensor piezoeléctrico

13. En la figura 1, un trayecto de señal directa de la señal de ultrasonidos se indica mediante la flecha 18. Asimismo, un trayecto de señal directa de la señal de ultrasonidos en sentido inverso se indica mediante la flecha 19. Una señal de respuesta es recogida por el sensor piezoeléctrico 13, enviada a la segunda unidad de cálculo 16 a lo largo del trayecto 20 de la señal, y digitalizada por la segunda unidad de cálculo 16.

En otra etapa, una señal de medición digital es obtenida a partir de la señal de respuesta digitalizada. La obtención de la medición es una inversión de la señal de respuesta digitalizada, con respecto al tiempo. Según otras realizaciones, la obtención comprende otras etapas tales como una conversión a una resolución reducida en el rango de amplitud, un filtrado de ancho de banda de la señal para eliminar el ruido, tal como ruido de baja frecuencia y ruido de alta frecuencia. En concreto, la etapa de filtrado de ancho de banda puede ser ejecutada antes de la etapa de invertir la señal con respecto al tiempo.

La inversión de la señal puede ser llevada a cabo de diversas maneras, por ejemplo, leyendo un área de memoria en sentido inverso o invirtiendo el signo de los componentes sinusoidales en una representación de Fourier.

En una realización, se selecciona una porción adecuada de la señal de respuesta digitalizada que contiene la respuesta de la señal directa. A la porción de la señal de respuesta se le da vuelta o es invertida en el tiempo. En otras palabras, las porciones de señal de la señal de respuesta que se reciben más tarde son enviadas antes en la señal de medición invertida. Si una señal está representada por una secuencia ordenada en el tiempo de muestras de amplitud, a modo de ejemplo, la inversión de la señal mencionada anteriormente equivale a invertir el orden de las muestras de amplitud.

La señal resultante, en la que se ha invertido la dirección o el signo del tiempo, se denomina, asimismo, “señal invertida”. La expresión “invertida” en este contexto hace referencia a una inversión con respecto a la dirección del tiempo, y no a una inversión con respecto a un valor, tal como el valor de la amplitud.

Las figuras 10 a 19 muestran, a modo de ejemplo, señales digitales según la presente memoria descriptiva.

En un caudalímetro según una realización de la presente memoria descriptiva, se utiliza la misma señal de medición para ambos sentidos 18, 19, el sentido aguas abajo y el sentido aguas arriba, proporcionando una disposición simple y eficiente. Según otras realizaciones, se utilizan diferentes señales de medición para ambos sentidos. En concreto, la señal de medición puede ser aplicada al receptor original de la señal de ensayo. Dichas disposiciones pueden proporcionar beneficios para condiciones asimétricas y formas de tubería.

Un procedimiento para medir la velocidad de flujo de un líquido a través de una tubería, que utiliza la señal invertida mencionada anteriormente como una señal de medición, comprende las siguientes etapas.

La señal de medición mencionada anteriormente es enviada desde la primera unidad de cálculo 15 al transductor piezoeléctrico 11 a lo largo del trayecto de señal 17. El transductor piezoeléctrico 11 genera una señal de medición de ultrasonidos correspondiente. Ejemplos de dichas señales de medición se proporcionan en las figuras 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 37 y 38.

La señal de medición de ultrasonidos se desplaza a través del líquido en la tubería 12 hasta el sensor piezoeléctrico 13. Una señal de respuesta es captada por el sensor piezoeléctrico 13, enviada a la segunda unidad de cálculo 16 a lo largo del trayecto 20 de la señal, y digitalizada por la segunda unidad de cálculo 16.

La segunda unidad de cálculo 16 envía la señal de respuesta digitalizada a la primera unidad de cálculo 15. La primera unidad de cálculo 15 determina un tiempo de vuelo de la señal recibida, por ejemplo, utilizando uno de los procedimientos que se describen más adelante.

Un proceso similar es llevado a cabo para una señal que se desplaza en sentido inverso 19, a saber, la señal de medición mencionada anteriormente es aplicada al elemento piezoeléctrico aguas abajo 13 y una señal de respuesta es medida por el elemento piezoeléctrico aguas arriba 11 para obtener un tiempo de vuelo TOF aguas arriba en sentido inverso19. La primera unidad de cálculo 15 determina una velocidad de flujo, por ejemplo, según la fórmula

$$v = \frac{c^2}{2 \cdot L \cdot \cos\beta} \cdot \left(TOF_{\text{aguas arriba}} - TOF_{\text{aguas abajo}}\right),$$

en la que L es la longitud del trayecto directo entre los elementos piezoeléctricos 11, 13, β es el ángulo de inclinación del trayecto directo entre los elementos piezoeléctricos 11, 13 y la dirección del flujo promedio, y c es la velocidad del sonido en el líquido en las condiciones de presión y temperatura dadas.

El cuadrado de la velocidad del sonido c^2 se puede aproximar a un segundo orden mediante la expresión

$$c^2 \approx \frac{L^2}{TOF_{\text{aguas arriba}} * TOF_{\text{aguas abajo}}}$$

que conduce a la fórmula

$$v = \frac{L}{2 * \cos\beta} \cdot \frac{TOF_{\text{aguas arriba}} - TOF_{\text{aguas abajo}}}{TOF_{\text{aguas arriba}} * TOF_{\text{aguas abajo}}}$$

Por lo tanto, no es necesario determinar la temperatura o la presión que, a su vez, determinan la densidad del fluido y la velocidad del sonido, o medir la velocidad del sonido o la densidad del fluido directamente. Por el contrario, el primer orden del error no se cancela solo para un sentido de medición.

En lugar de utilizar un factor $2 \cdot L \cdot \cos\beta$, se puede obtener una constante de proporcionalidad a partir de una medición de calibración con una velocidad de flujo conocida. La constante de proporcionalidad de la calibración tiene en cuenta otros efectos, tales como los perfiles de flujo y las contribuciones de las ondas de sonido que se dispersaron y no se desplazaron en línea recta.

Según otra realización, el proceso de generar una señal de impulso, registrar una señal de respuesta y obtener una señal de medición invertida a partir de la señal de respuesta es simulado en un ordenador. Parámetros relevantes, tales como el diámetro de la tubería 12 y las ubicaciones del sensor son proporcionados como parámetros de entrada a la simulación.

Según otra realización más, la señal de medición, que debe ser suministrada a un elemento piezoeléctrico de transmisión, es sintetizada utilizando una forma de una señal de respuesta habitual a una señal de impulso, tal como las formas de señal mostradas en las figuras 37 y 38. Por ejemplo, la señal de medición puede ser proporcionada mediante una oscilación sinusoidal de 1 MHz, que está modulada en amplitud con una envolvente según una función de probabilidad gaussiana que tiene un medio ancho de 10 microsegundos. El medio ancho se puede elegir como parámetro de entrada, que depende de la disposición real, tal como el diámetro de la tubería y la ubicación del sensor.

Un caudalímetro según la presente memoria descriptiva puede proporcionarse, asimismo, como un caudalímetro predefinido en el que la señal de medición es generada durante una prueba de funcionamiento en una fábrica, en concreto cuando el caudalímetro es suministrado junto con una sección de tubería.

Según una realización simple de la presente memoria descriptiva, un tiempo de vuelo en sentido aguas arriba y aguas abajo se determina evaluando un tiempo de amplitud máxima de una señal recibida con respecto al tiempo de envío de la señal de medición. Para conseguir una mayor precisión, el máximo puede ser determinado utilizando una envolvente de la señal recibida. Según otra realización, la medición es repetida varias veces, y se utiliza un tiempo promedio de vuelo.

Según otra realización de la presente memoria descriptiva, el tiempo de vuelo de una señal es evaluado utilizando una técnica de correlación cruzada. En concreto, los cambios de tiempo respectivos pueden ser evaluados mediante la correlación cruzada de la señal recibida aguas abajo o aguas arriba con la señal recibida a velocidad de flujo cero según la fórmula:

$$CCorr(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} Sig_{\text{Flujo}}(t) \cdot Sig_{\text{SinFlujo}}(t+\tau),$$

en la que Sig_Flujo representa una señal aguas arriba o aguas abajo en condiciones de medición, cuando existe un flujo de fluido a través de la tubería, y en la que Sig_SinFlujo representa una señal en condiciones de calibración con flujo cero. Los límites de suma infinita representan una ventana de tiempo suficientemente grande [-T1, +T2]. Dicho de manera más general, -T1 y +T2 no tienen que ser iguales y, por razones prácticas, esto puede ser ventajoso para el caudalímetro.

El desfase de tiempo *TOF_aguas arriba - TOF_aguas abajo* se obtiene, por lo tanto, comparando el tiempo del máximo de la función de correlación aguas arriba con el tiempo del máximo de la función de correlación aguas abajo. La envolvente de la función de correlación puede ser utilizada para determinar la ubicación del máximo con mayor precisión.

En otra realización, está dispuesta una unidad de evaluación separada entre la primera unidad de cálculo 15 y la segunda unidad de cálculo 16, que realiza el cálculo de los tiempos de llegada de la señal y la velocidad del flujo.

En general, la señal medida del sensor acústico resulta de una superposición de señales dispersas y una señal directa. Las señales dispersas se dispersan desde las paredes de la tubería una o varias veces. Esto se muestra, a modo de ejemplo, en las figuras 2 y 3.

La configuración del transductor de la figura 1 es una configuración de línea directa o “Z”. Asimismo, son posibles otras disposiciones, que hacen uso de reflexiones en un lado opuesto de la tubería, tal como la configuración “V” y “W”. Las configuraciones V y W funcionan en base a reflexiones en la pared de la tubería, que inducen más dispersiones que la configuración Z. La materia de la solicitud se beneficiará de estas configuraciones siempre que los trayectos sean comprendidos correctamente.

En una configuración V, los dos transductores están montados en el mismo lado de la tubería. Para registrar una reflexión de 45 grados, se colocan separados aproximadamente un diámetro de tubería en la dirección del flujo. La configuración W utiliza tres reflexiones. De manera similar a la configuración V, los dos transductores están montados en el mismo lado de la tubería. Para registrar una señal después de dos reflexiones de 45 grados, se colocan separados dos diámetros de tubería en la dirección del flujo.

La figura 2 muestra, a modo de ejemplo, una primera señal acústica que se desplaza directamente del elemento piezoeléctrico 11 al elemento piezoeléctrico 13.

Por sencillez, los eventos de dispersión se muestran como reflexiones en las figuras 2 a 5, pero el proceso de dispersión real puede ser más complicado. En concreto, la dispersión más relevante ocurre habitualmente en la pared de la tubería o en el material que está montado delante de los transductores piezoeléctricos. La dispersión recibida depende, asimismo, de la disposición del sensor. A modo de ejemplo, las figuras 45, 46 y 47 muestran las disposiciones de sensor Z, V y W. La figura 3 muestra una vista de la figura 2 en la dirección del flujo en la dirección de visualización A-A.

Las figuras 4 y 5 muestran una segunda disposición de sensor en la que un elemento piezoeléctrico 22 adicional está posicionado en un ángulo de 45 grados con respecto al elemento piezoeléctrico 11 y un elemento piezoeléctrico 23 adicional está posicionado en un ángulo de 45 grados con respecto al elemento piezoeléctrico 13.

Además, las figuras 4 y 5 muestran trayectos de señal acústica directos o en línea recta para una situación en la que los elementos piezoeléctricos 11, 22 funcionan como transductores piezoeléctricos y los elementos piezoeléctricos 13, 23 funcionan como sensores acústicos. El elemento piezoeléctrico 23, que está en la parte posterior de la tubería 12 en la vista de la figura 4, se muestra mediante una línea discontinua en la figura 4.

Las figuras 6 a 9 muestran, de manera simplificada, un procedimiento para generar una señal de medición a partir de una respuesta de una señal de ensayo. En las figuras 6 a 9, las pérdidas debidas a la dispersión se indican mediante porciones sombreadas de una señal y mediante flechas.

Para las consideraciones de las figuras 6 a 9, se supone que la señal acústica solo se propaga a lo largo de un trayecto de línea recta, a lo largo de un primer canal de dispersión con un retardo de Δt, y a lo largo de un segundo canal de dispersión con un retardo de $2\Delta t$. La atenuación de la señal a lo largo de los trayectos no está considerada.

Una señal de ensayo en forma de una punta rectangular es aplicada al elemento piezoeléctrico 11. Debido a la dispersión, una primera porción de la amplitud de la señal se pierde debido al primer trayecto de dispersión y aparece después de un tiempo Δt, y una segunda porción de la amplitud de la señal se pierde debido al segundo trayecto de dispersión y aparece después de un tiempo $2\Delta t$. Esto produce una señal según las columnas blancas de la figura 7, que es registrada en el elemento piezoeléctrico 13.

Un procesador de señal invierte esta señal registrada, con respecto al tiempo, y aplica la señal invertida al elemento piezoeléctrico 11. El mismo proceso de dispersión que se explicó anteriormente es aplicado a continuación a las tres componentes de la señal. Como resultado, una señal según la figura 9 es registrada en el elemento piezoeléctrico 13, que es aproximadamente simétrica.

En realidad, las señales recibidas se distribuirán a lo largo del tiempo y, a menudo, hay una “onda superficial” que se ha desplazado a través del material de la tubería y llega antes de la señal directa. Esta onda superficial es descartada eligiendo una ventana de tiempo adecuada para generar la señal de medición invertida. Asimismo, las señales que provienen de reflexiones múltiples y llegan tarde pueden ser descartadas limitando la ventana de tiempo y/o eligiendo partes específicas de la señal.

La siguiente tabla muestra los retardos medidos para una alineación directa o, en otras palabras, para una conexión en línea recta entre elementos piezoeléctricos fijados en una tubería DN 250 en un plano perpendicular a la extensión longitudinal de la tubería DN 250. La velocidad de flujo hace referencia a un flujo de agua a través de la tubería DN 250.

En el presente documento “TOF 1 ciclo” hace referencia a un impulso tal como el que se muestra en la figura 36, que

es generado por un elemento piezoeléctrico, que es excitado por una señal eléctrica con 1 oscilación que tiene un período de 1 µs. “TOF 10 ciclos” hace referencia a una señal generada por un elemento piezoeléctrico, que es excitada por una señal eléctrica con 10 oscilaciones sinusoidales de amplitud constante que tiene un período de 1 µs.

Caudal/Procedimiento	21 m^3/h	44 m^3/h	61 m^3/h
TOF 1 ciclo	7 ns	18 ns	27 ns
TOF 10 ciclos	9 ns	19 ns	26 ns
Inversión del tiempo	8 ns	18 ns	27 ns

Las figuras 10 a 27 muestran señales invertidas de alta resolución y sus respectivas señales de respuesta. La tensión está representada en unidades arbitrarias a lo largo del tiempo en microsegundos.

Los ejes de tiempo en las figuras superiores muestran un tiempo de transmisión de la señal invertida. El tiempo de transmisión está limitado a la ventana de tiempo que se utiliza para registrar la señal invertida. En el ejemplo de las figuras 10 a 27, la ventana de tiempo comienza poco antes del inicio del máximo, que proviene de la señal directa y termina 100 microsegundos a partir de entonces.

Los ejes de tiempo en las figuras inferiores están centrados alrededor del máximo de las señales de respuesta y se extienden 100 microsegundos, que es el tamaño de la ventana de tiempo para la señal invertida, antes y después del máximo de la señal de respuesta.

Las figuras 28 a 35 muestran señales invertidas digitalizadas en alta resolución y en resolución de 12, 3, 2 y 1 bit en el rango de amplitud y sus respectivas señales de respuesta. La tensión está representada en voltios a lo largo del tiempo en microsegundos. Las señales de las figuras 28 a 35 se obtuvieron para una tubería DN 250 llena de agua.

La longitud de la ventana de tiempo para la señal invertida es de 450 microsegundos. Por lo tanto, la ventana de tiempo de las figuras 28 a 35 es más de cuatro veces mayor que en las figuras anteriores 9 a 27.

En las figuras 28 a 35 se puede ver que incluso una digitalización con resolución de 1 bit produce un pico agudo. Se puede ver que el pico se vuelve aún más pronunciado para las resoluciones más bajas. Una posible explicación de este efecto es que, en el ejemplo de las figuras 28 a 35, la energía total de la señal de entrada se incrementa utilizando una digitalización aproximada en el rango de amplitud, mientras que la señal de respuesta permanece concentrada en el tiempo.

La figura 36 muestra una señal generada por un elemento piezoeléctrico después de recibir un pulso eléctrico que dura aproximadamente 0,56 microsegundos, que es equivalente a una frecuencia de 3,57 MHz. Debido a la inercia del elemento piezoeléctrico, la amplitud máxima para la tensión negativa es menor que para la tensión positiva, y se producen múltiples reverberaciones antes de que el elemento piezoeléctrico se detenga.

La figura 37 muestra una señal eléctrica que se aplica a un elemento piezoeléctrico, tal como el elemento piezoeléctrico aguas arriba 11 de la figura 1. La señal de la figura 37 se obtiene formando un promedio de diez señales de respuesta digitalizadas a una señal del tipo que se muestra en la figura 36 e invirtiendo la señal en el tiempo, donde las señales de respuesta son recibidas por un elemento piezoeléctrico tal como el elemento piezoeléctrico aguas abajo 13 de la figura 1.

En el ejemplo de la figura 37, las señales digitalizadas son obtenidas cortando una porción de señal de la señal de respuesta que comienza aproximadamente 10 microsegundos antes del inicio de la envolvente de la señal de respuesta, y que termina aproximadamente 55 microsegundos después de la envolvente de la señal de respuesta. La forma de la envolvente de la señal de respuesta de la figura 37 es similar a la forma de una distribución de probabilidad gaussiana o, en otras palabras, a una versión adecuada desplazada y escalada de exp(-x^2).

La figura 38 muestra una porción de una señal de respuesta de la señal mostrada en la figura 37, en la que la señal de la figura 37 es aplicada a un primer elemento piezoeléctrico, tal como el elemento piezoeléctrico aguas arriba 11, y es recibida en un segundo elemento piezoeléctrico, tal como el elemento piezoeléctrico aguas abajo 13 de la figura 1.

La figura 39 muestra una función de correlación cruzada aguas arriba y una función de correlación cruzada aguas abajo, que son obtenidas correlacionando de manera cruzada la señal aguas arriba y la señal aguas abajo de la disposición de la figura 1 con una señal obtenida a flujo cero, respectivamente.

La figura 40 muestra una ampliación en sección de la figura 39. Dos marcadores de posición indican las posiciones de los respectivos máximos de la función de correlación cruzada aguas arriba y aguas abajo. La diferencia de tiempo

entre los máximos es una medida de la diferencia de tiempo entre la señal aguas arriba y la señal aguas abajo.

Las figuras 48, 49 y 50 muestran tres señales de envío diferentes: la figura 48 muestra un pulso convencional (1 ciclo) y la figura 48 muestra un pulso de 10 ciclos en comparación con la señal de medición generada tal como se ha descrito anteriormente, tal como la señal de la figura 50. Los transductores han sido fijados en una tubería DN250.

Las figuras 51, 52 y 53 muestran las señales recibidas correspondientes después de enviar las señales mostradas en las respectivas figuras 48, 59 y 50. En comparación, se puede ver fácilmente que la señal de medición enfoca la energía y genera una amplitud más de dos veces mayor de la señal de recepción en comparación con las señales de recepción en respuesta a los pulsos convencionales (por ejemplo, de 1 o 10 ciclos) de las figuras 48 y 49.

La figura 41 muestra, a modo de ejemplo, un dispositivo 60 de medición de flujo para medir un flujo en la disposición de la figura 1 o en otras disposiciones, según la memoria descriptiva. En la disposición de la figura 1, el dispositivo 60 de medición de flujo es proporcionado por la primera y la segunda unidades de cálculo 15, 16.

El dispositivo 60 de medición de flujo comprende un primer conector 61 para conectar un primer transductor piezoeléctrico y un segundo conector 62 para conectar un segundo transductor piezoeléctrico. El primer conector 61 está conectado a un convertidor de digital a analógico (DAC) 64 a través de un multiplexor 63. El segundo conector 62 está conectado a un convertidor de analógico a digital 65 a través de un demultiplexor 66.

El ADC 65 está conectado a una unidad de selección de señal 67, que está conectada a una unidad de inversión de señal 68, que está conectada a un filtro de paso de banda 69, que está conectado a una memoria 70 legible por ordenador. Además, el ADC 65 está conectado a una unidad de cálculo de velocidad 71.

El DAC 64 está conectado a un generador de señal de impulso 72 y a un generador de señal de medición 73. El generador de señal de medición está conectado al generador de impulsos 72 a través de una línea de comando 74. La unidad de cálculo de velocidad 71 está conectada al generador de señal de medición 73 a través de una segunda línea de comando 75.

En general, el generador de señal de impulso 72 y el generador de señal de medición comprenden elementos de hardware, tales como un oscilador, y elementos de software, tales como un módulo de generación de impulsos y un módulo de generación de señal de medición. En este caso, las líneas de comando 74, 75 pueden ser proporcionadas por interfaces de software entre los módulos respectivos.

Durante una fase de generación de señal, el generador de señal de impulso envía una señal al DAC 64, la unidad de selección 67 recibe una señal entrante correspondiente a través del ADC 65 y selecciona una porción de una señal entrante. La unidad de inversión 68 invierte la porción de señal seleccionada, con respecto al tiempo, el filtro de paso de banda 69 opcional filtra las frecuencias inferiores y superiores y la señal de medición resultante es almacenada en la memoria del ordenador 70. Cuando la palabra “señal” se utiliza con referencia a una etapa de manipulación de señal, en concreto puede hacer referencia a una representación de una señal en la memoria de un ordenador.

En concreto, una representación de señal puede estar definida por pares de valores de amplitudes digitalizadas y tiempos discretos asociados. Otras representaciones comprenden, entre otros, coeficientes de Fourier, coeficientes de ondícula y una envolvente para modular en amplitud una señal.

La figura 42 muestra una segunda realización de un dispositivo 60’ de medición de flujo para medir un flujo en la disposición de la figura 1 o en otras disposiciones, según la memoria descriptiva. El dispositivo 60’ de medición de flujo comprende un sintetizador digital directo (DDS) 76. Para simplificar, solo se muestran los componentes del DDS 76. El DDS 76 también se conoce como generador de forma de onda arbitraria (AWG, Arbitrary Waveform Generator).

El DDS 76 comprende un oscilador 77 de referencia, que está conectado a un registro de control de frecuencia 78, a un oscilador 79 de control numérico (NCO, Numerically Controlled Oscillator) y al DAC 64. Una entrada del NCO 79 para N canales está conectada a una salida del registro del controlador de frecuencia 78. Una entrada del DAC 64 para M canales está conectada al NCO 79 y una entrada de un filtro de paso bajo de reconstrucción está conectada al DAC 64. A modo de ejemplo, un oscilador 79 de control numérico directo con una frecuencia de reloj de 100 MHz puede ser utilizado para generar una señal de 1 MHz modulada en amplitud.

Una salida del filtro 80 de paso bajo de reconstrucción está conectada a los transductores piezoeléctricos 11, 13 de la figura 1.

Debido a la inercia de un cristal del oscilador, a menudo es ventajoso utilizar un oscilador con una frecuencia más alta que la de una onda portadora para obtener una señal modulada de amplitud predeterminada, por ejemplo, utilizando un sintetizador digital directo.

Las figuras 45, 47 y 48 muestran las configuraciones de medición de flujo Z, V y W mencionadas anteriormente. En

los ejemplos de las figuras 45, 47 y 48, los transductores de abrazadera están unidos a un conducto a través de piezas de acoplamiento respectivas.

Las figuras 54 y 55 muestran una comparación de las señales de recepción o respuesta respectivas con las señales de envío respectivas que fueron generadas sin utilizar un procedimiento de inversión de tiempo y con la utilización de un procedimiento de inversión de tiempo.

En el ejemplo de la figura 54, una onda sinusoidal modulada con una envolvente en forma gaussiana se utiliza como señal de envío. La energía de señal de la señal de envío es proporcional a $1,3 \times 10^{-7}$ $(Pa/m)^2$ s y la amplitud de la señal es 0,1 Pa. El valor se obtiene integrando el cuadrado de la presión por unidad de longitud a lo largo del tiempo. La señal de respuesta tiene una amplitud de pico a pico de la señal de recepción de aproximadamente 0,09 Pa.

En el ejemplo de la figura 55, una señal invertida en el tiempo, que es obtenida a partir de la señal de respuesta de la señal de impulso de la figura 56, se utiliza como señal de envío. La señal de envío es ajustada para tener la misma energía de señal de $1,3 \times 10^{-7}$ $(Pa/m)^2$ s que la señal de envío de la figura 54. Esto produce una amplitud de pico a pico de la señal de recepción que es de aproximadamente 0,375 Pa.

La amplitud de recepción de la figura 55 es más de cuatro veces mayor que la amplitud de la señal de recepción de la figura 54. La mayor amplitud en el lado de recepción puede proporcionar un reconocimiento de la señal más fácil y más estable. Entre otros, el aumento de la amplitud puede ser ajustado ajustando la resolución de bits de la amplitud de la señal invertida en el tiempo, en concreto aumentando o disminuyendo la resolución de bits para obtener una amplitud mayor.

Las figuras 56 y 57 muestran cómo se pueden utilizar las señales de recepción para obtener información sobre el canal de transmisión y, en concreto, sobre el grosor de la pared del conducto, depósitos en la pared. Según la presente memoria descriptiva, una respuesta a la señal de medición, que es la señal de respuesta invertida en el tiempo, puede ser analizada para permitir una determinación de los cambios de las propiedades del material de la tubería, tales como grietas, costra, etc. En una medición de flujo según una realización de la presente memoria descriptiva, estos cambios de propiedades se determinan analizando la misma señal de recepción que se utiliza para la medición del tiempo de vuelo.

La figura 57 muestra una primera señal de respuesta, que contiene información sobre un primer canal de transmisión.

La figura 58 muestra una segunda señal de respuesta, que contiene información sobre un segundo canal de transmisión. La longitud de la flecha horizontal en el lóbulo principal central se extiende entre el lóbulo lateral izquierdo y el lóbulo lateral derecho, que están a la izquierda y derecha del lóbulo principal, respectivamente. La longitud de la flecha representa el grosor de la pared de una tubería si la señal está generada según la figura 46. El grosor medido de la pared es determinado en el lugar en el que la onda es reflejada en la parte inferior de la tubería en la figura 46. Si hay un depósito en la pared de la tubería, el grosor de pared medido aumentará.

La figura 59 muestra otra señal de respuesta. La configuración experimental para obtener la señal de la figura 59 comprende transductores de abrazadera en ángulo, un cabezal de acoplamiento de transductor acrílico, una velocidad del sonido de c = 2370 m/s, un ángulo de acoplamiento de 40º, una pared de acero inoxidable, una velocidad de onda transversal de c = 3230 m/s, 61,17º, agua como fluido, una velocidad del sonido en el fluido de c = 1480 m/s, un eje de ángulo de onda transversal de 23,67º y un ángulo de flujo de 66,33º, extraído de la figura 59.

La figura 60 muestra otra señal de respuesta. La configuración experimental para obtener la señal de la figura 60 comprende un cabezal de acoplamiento del transductor acrílico, una velocidad del sonido de c = 2370 m/s, un ángulo de acoplamiento de 20º, una pared de acero inoxidable, una velocidad de onda longitudinal de c = 5790 m/s, 56,68º, onda transversal c = 3230 m/s, agua como fluido, una velocidad del sonido en el fluido de c = 1480 m/s, un eje de ángulo de onda longitudinal = 12,33º, un eje de ángulo de onda transversal de 12,33º, y un ángulo de flujo de 77,67º, extraído de la figura 60.

Las configuraciones de instalación alternativas para las figuras 59 y 60 se muestran en las figuras 45, 46 y 47.

Según una realización de la presente memoria descriptiva, las propiedades del canal se deducen analizando una señal de recepción, tal como las señales de las figuras 57 a 60.

El ejemplo de las figuras 59 y 60 muestra las diferencias en las señales de recepción dependiendo de la presencia de ondas longitudinales y transversales en el material de la tubería. La presencia de estas ondas es típica para el material y la geometría seleccionados, y puede ser utilizada para el análisis de materiales. Dicho análisis de material basado en ondas de ensayo ultrasónicas es utilizado en el sector de aplicación de los ensayos no destructivos (NDT, Non-Destructive Testing). La presente memoria descriptiva permite el análisis simultáneo del flujo y, por ejemplo, del material de la tubería, puesto que la señal recibida contiene la respuesta al impulso del sistema de medición, incluidos el canal de transmisión y el entorno material.

El análisis de las señales de recepción puede ser llevado a cabo de diversas maneras, tales como comparando la señal de recepción con una respuesta al impulso recibida previamente o mediante evaluación directa de una respuesta al impulso, por ejemplo, para determinar el grosor de una pared.

Aunque la descripción anterior contiene mucha especificidad, no debe ser interpretada como limitativa del alcance de las realizaciones, sino que, simplemente, proporciona una ilustración de las realizaciones previsibles. Las etapas del procedimiento pueden ser llevadas a cabo en un orden diferente al de las realizaciones dadas a conocer, y la subdivisión del dispositivo de medición en unidades de procesamiento y sus respectivas interconexiones pueden ser diferentes de las realizaciones dadas a conocer.

En concreto, las etapas del procedimiento de almacenar una representación digital de una señal y realizar operaciones tales como seleccionar una porción de señal, invertir el tiempo de una señal y filtrar una señal, pueden ser intercambiadas. Por ejemplo, una señal puede ser almacenada en forma invertida en el tiempo o puede ser leída en orden inverso, para obtener una señal invertida en el tiempo.

Si bien la presente invención se explica con respecto a una tubería DN 250 redonda, puede ser aplicada fácilmente a otros tamaños de tubería o incluso a otras formas de tubería. Aunque las realizaciones se explican con respecto a los transductores de abrazadera, también se pueden utilizar transductores introducidos en el fluido, que sobresalen en una tubería o se instalan en un canal abierto.

Especialmente, las ventajas indicadas anteriormente de las realizaciones no deben ser interpretadas como limitativas del alcance de las realizaciones, sino simplemente para explicar posibles logros si se ponen en práctica las realizaciones descritas. Por lo tanto, el alcance de la invención está determinado por las reivindicaciones, más que por los ejemplos dados a conocer.

Referencia

10 disposición de caudalímetro
11 elemento piezoeléctrico aguas arriba
12 tubería
13 elemento piezoeléctrico aguas abajo
14 dirección del flujo promedio
15 primera unidad de cálculo
16 segunda unidad de cálculo
17 trayecto de señal
20 trayecto de señal
22 elemento piezoeléctrico
23 elemento piezoeléctrico
31 a 52 elementos piezoeléctricos
60, 60’ dispositivo de medición de caudal
61 primer conector
62 segundo conector
63 multiplexor
64 DAC
65 ADC
66 demultiplexor
67 unidad de selección de señal
68 unidad de inversión de señal
69 filtro de paso de banda
70 memoria
71 unidad de cálculo de velocidad
72 generador de señal de impulso
73 generador de señal de medición
74 línea de comando
75 línea de comando
76 DDS
77 oscilador de referencia
78 registro del controlador de frecuencia
79 oscilador de control numérico
80 filtro de paso bajo

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar la velocidad de flujo de un fluido en un conducto de fluido (12) con un caudalímetro de tiempo de desplazamiento, que comprende

- dotar al conducto de fluido (12) de un fluido que tiene una velocidad predeterminada con respecto al conducto de fluido (12),
- aplicar una señal de impulso a uno de un primer transductor ultrasónico (11, 22) y un segundo transductor ultrasónico (13, 23), estando provisto el segundo transductor ultrasónico (13, 23) aguas arriba o aguas abajo del primer transductor ultrasónico (11, 22),
- recibir una señal de respuesta a la señal de impulso en el otro del primer y el segundo transductor ultrasónico (13, 23),
- obtener una señal de medición a partir de la señal de respuesta, comprendiendo la obtención de la señal de medición seleccionar una porción de señal de la señal de respuesta o de una señal obtenida a partir de la misma, e invertir la porción de señal con respecto al tiempo, obteniendo de este modo una versión invertida de la señal de respuesta con respecto al tiempo,
- almacenar la señal de medición para una utilización posterior,
- aplicar la señal de medición a uno del primer transductor ultrasónico (11, 22) y del segundo transductor ultrasónico (13, 23), comprendiendo la señal de medición una porción de señal invertida con respecto al tiempo de la señal de respuesta de la señal de impulso o de una señal obtenida a partir de la misma y,
- medir una primera señal de respuesta de la señal de medición en el otro del primer transductor ultrasónico (11, 22) y el segundo transductor ultrasónico (13, 23),
- obtener un tiempo de vuelo a partir de la primera señal de respuesta,
- obtener una velocidad de flujo del fluido a partir del tiempo de vuelo.

2. Procedimiento, según la reivindicación 1, que comprende

- repetir las etapas de aplicar la señal de medición y medir la señal de respuesta en el sentido inverso para obtener una segunda señal de respuesta,
- obtener un tiempo de vuelo a partir de la primera señal de respuesta y la segunda señal de respuesta,
- obtener una velocidad de flujo del fluido a partir del tiempo de vuelo.

3. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que la porción de señal que se utiliza para obtener la señal de medición comprende una primera porción alrededor de una amplitud máxima de la señal de respuesta y una porción posterior de señal, extendiéndose en el tiempo la porción posterior de señal detrás del tiempo de llegada de la amplitud máxima.

4. Procedimiento, según la reivindicación 1, que comprende

- repetir varias veces las etapas de aplicar una señal de impulso y recibir una señal de respuesta correspondiente, obteniendo de este modo una pluralidad de señales de respuesta,
- obtener la señal de medición a partir de un promedio de las señales de respuesta recibidas.

5. Procedimiento, según la reivindicación 1,
en el que la obtención de la señal de medición comprende digitalizar la señal de respuesta o una señal obtenida a partir de la misma, con respecto a la amplitud.

6. Procedimiento, según la reivindicación 5, que comprende aumentar la resolución de bits de la señal digitalizada para aumentar la amplitud de una señal de respuesta a la señal de medición.

7. Procedimiento, según la reivindicación 5, que comprende disminuir la resolución de bits de la señal digitalizada para aumentar la amplitud de una señal de respuesta a la señal de medición.

8. Procedimiento, según la reivindicación 5, en el que la resolución de bits de la señal digitalizada con respecto a la amplitud es una resolución de bits baja.

9. Procedimiento, según la reivindicación 1, que comprende el procesamiento, como mínimo, de una de las señales de respuesta para determinar un cambio en el grosor de la pared del conducto (12) o para determinar las características del material de las paredes del conducto (12) mediante la determinación de las características de la onda de sonido longitudinal y transversal.

10. Dispositivo (60) para medir una velocidad de flujo en un caudalímetro ultrasónico de tiempo de desplazamiento, que comprende

- un primer conector (61), para un primer elemento ultrasónico (11, 22), de dicho caudalímetro ultrasónico de tiempo de desplazamiento,

- un segundo conector (62), para un segundo elemento ultrasónico (13, 23), de dicho caudalímetro ultrasónico de tiempo de desplazamiento,
- una unidad de transmisión, para enviar una señal de impulso al primer conector (61),
- una unidad de recepción, para recibir la señal de respuesta a dicha señal de impulso desde el segundo conector (62),
- una unidad de selección (67), para seleccionar una porción de la señal de respuesta recibida o una señal obtenida a partir de la misma,
- una unidad de inversión (68), para invertir dicha porción de la señal de respuesta con respecto al tiempo para obtener una señal invertida,
- una unidad de procesamiento (15, 16, 71), para obtener una señal de medición a partir de la señal invertida y almacenar la señal de medición,
- un generador de señal de medición, para generar la señal de medición, pudiendo ser conectado el generador de señal de medición al primer conector (61) o al segundo conector (62),
- un medio de transmisión, para enviar la señal de medición al primer conector (61),
- una unidad de recepción, para recibir una señal de respuesta de la señal de medición desde el segundo conector (62),
- una segunda unidad de procesamiento (15, 16, 71), para obtener una velocidad de flujo a partir de la señal de respuesta recibida.

11. Dispositivo (60), según la reivindicación 10, que comprende, además,

- un convertidor D/A (64), estando conectado el convertidor D/A (64) al primer conector (61),
- un convertidor A/D (65), estando conectado el convertidor A/D (65) al segundo conector (62),
- una memoria (70) legible por ordenador, para almacenar la señal de medición.

12. Dispositivo (60), según la reivindicación 10, comprendiendo el dispositivo (60) un sintetizador digital directo (76) de señal, comprendiendo el sintetizador digital directo (76) de señal el ADC (65), un registro de control de frecuencia (78), un oscilador de referencia, un oscilador de control numérico y un filtro de reconstrucción de paso bajo, pudiendo ser conectado el ADC (65) al primer y al segundo conector (62) a través del filtro de reconstrucción de paso bajo.

13. Dispositivo (10), según la reivindicación 10, comprendiendo el dispositivo

- un primer transductor ultrasónico (11, 22), estando conectado el primer transductor ultrasónico (11, 22) al primer conector (61),
- un segundo transductor ultrasónico (13, 23), estando conectado el segundo transductor ultrasónico (13, 23) al segundo conector (62).

14. Dispositivo, según la reivindicación 13, que comprende una porción de una tubería (12), estando montado el primer transductor ultrasónico (11, 22) en la porción de tubería (12) en una primera ubicación,
y estando montado el segundo transductor ultrasónico (13, 23) en la porción de tubería (12) en una segunda ubicación.

15. Código de programa legible por ordenador, que comprende instrucciones legibles por ordenador para ejecutar el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9.

16. Memoria legible por ordenador, comprendiendo la memoria legible por ordenador código de programa legible por ordenador según la reivindicación 15.

17. Componente electrónico específico para la aplicación, que es operable para ejecutar el procedimiento según la reivindicación 1.

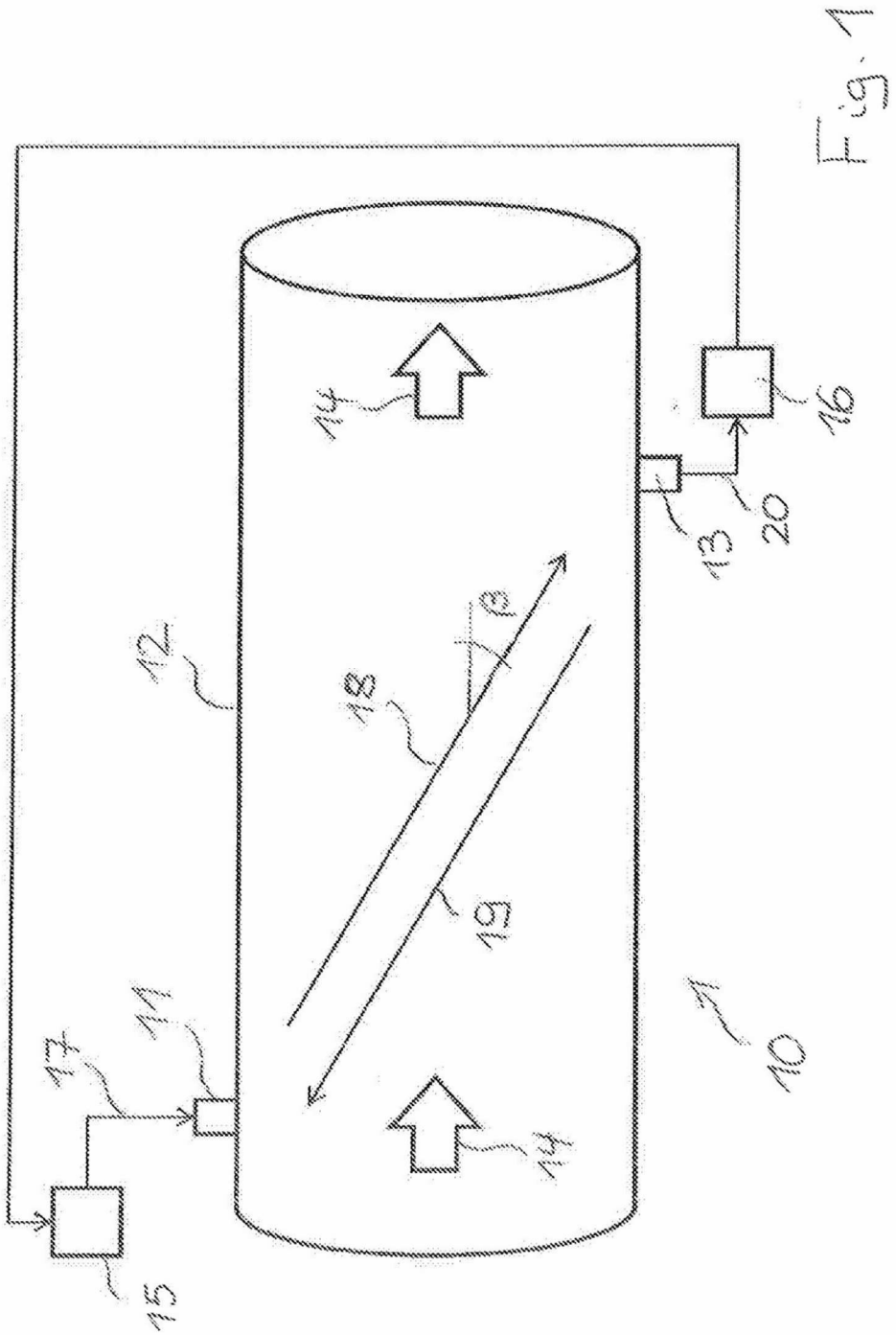


Fig. 1

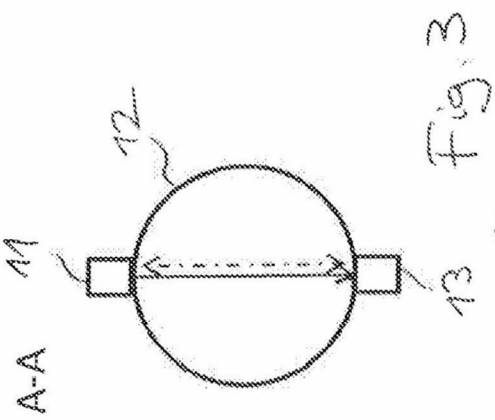


Fig. 3

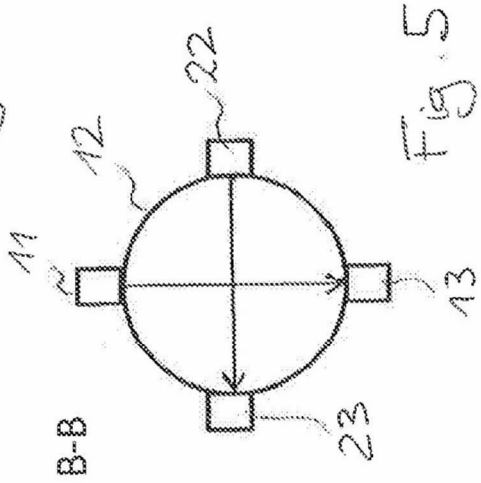


Fig. 5

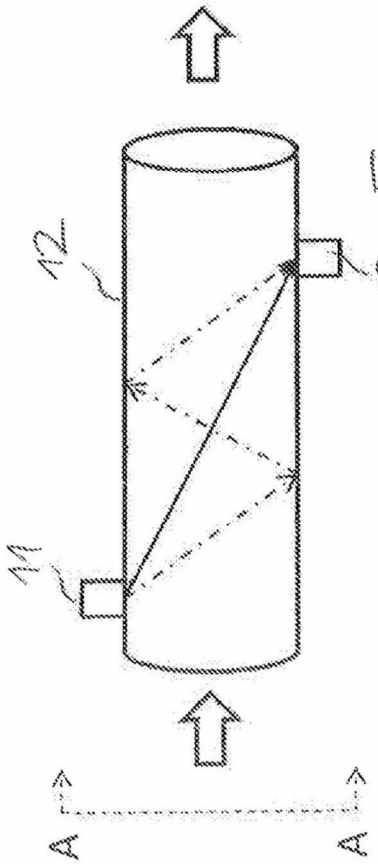


Fig. 2

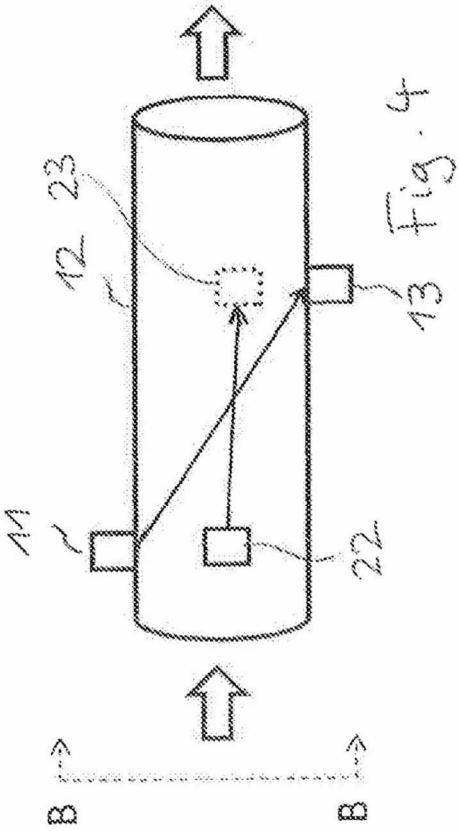


Fig. 4

Fig. 6

Fig. 7

Fig. 8

Fig. 9

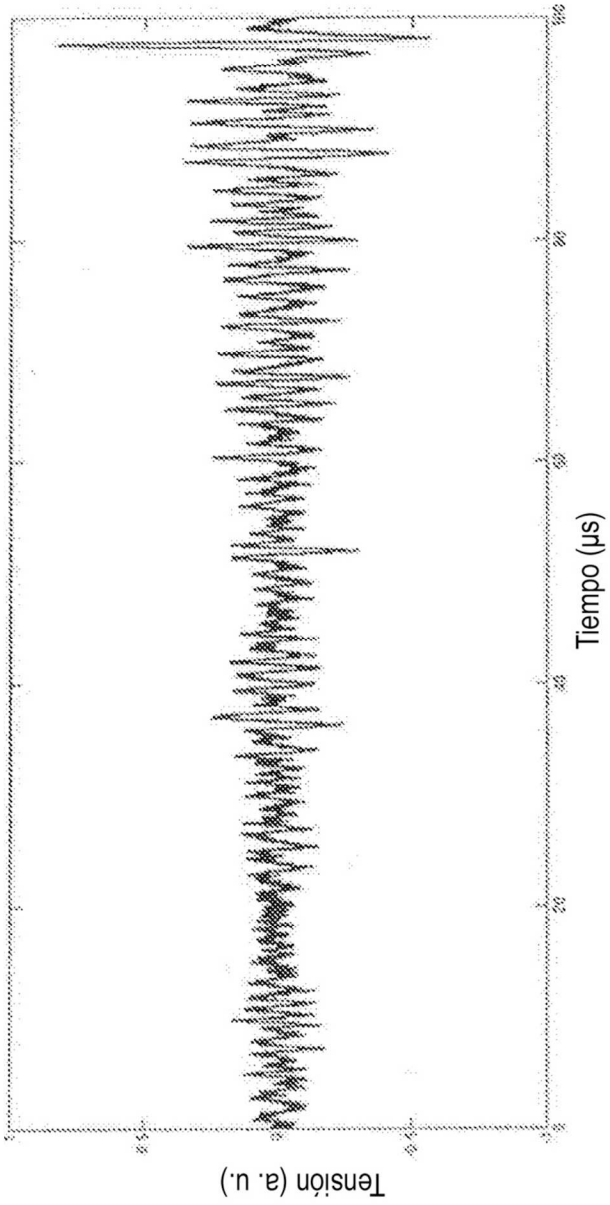


Fig. 10

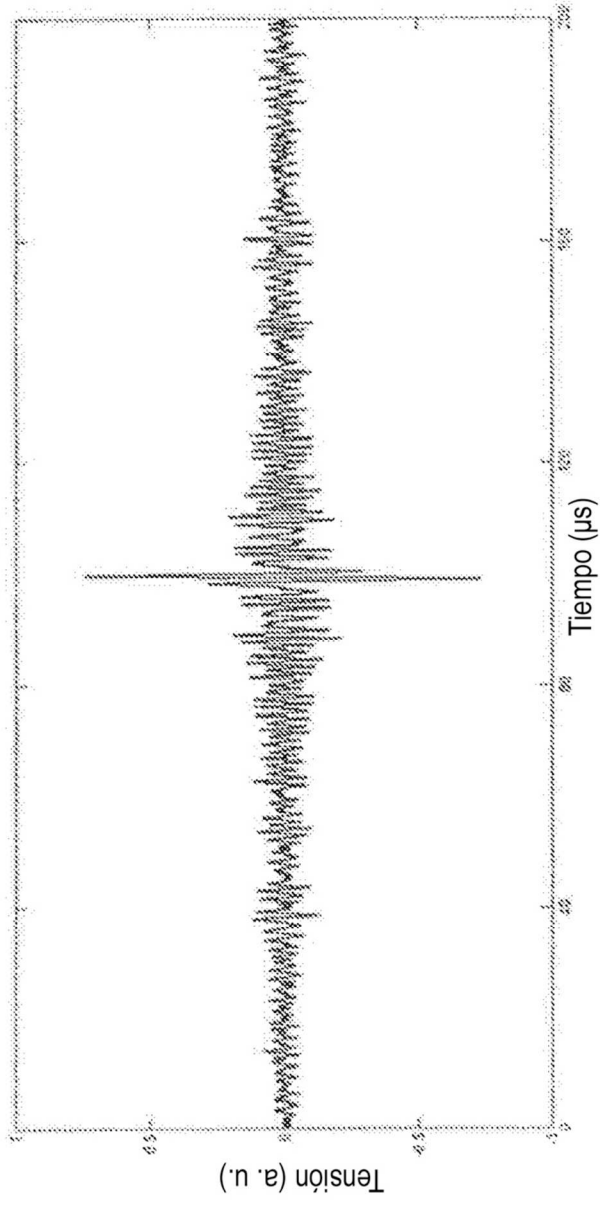


Fig. 11

Fig. 12

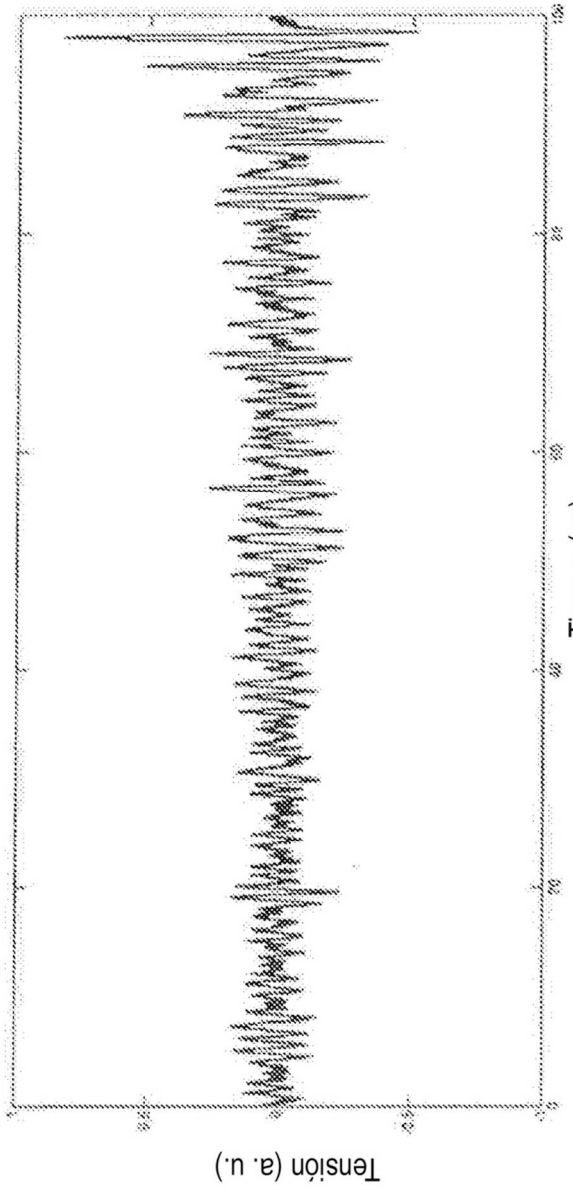
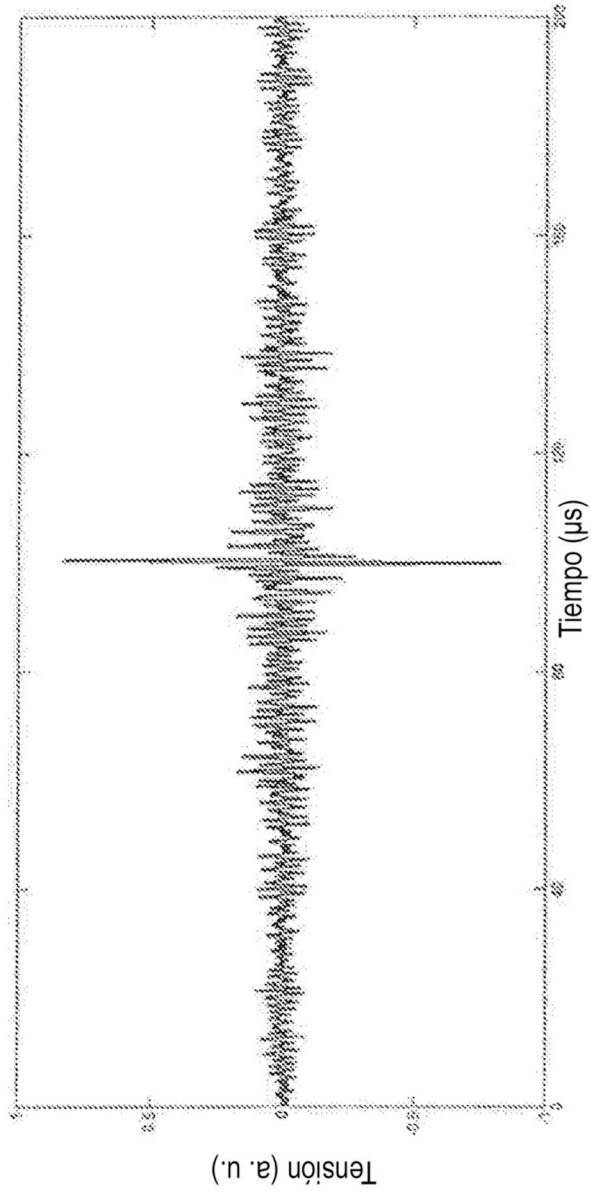


Fig. 13



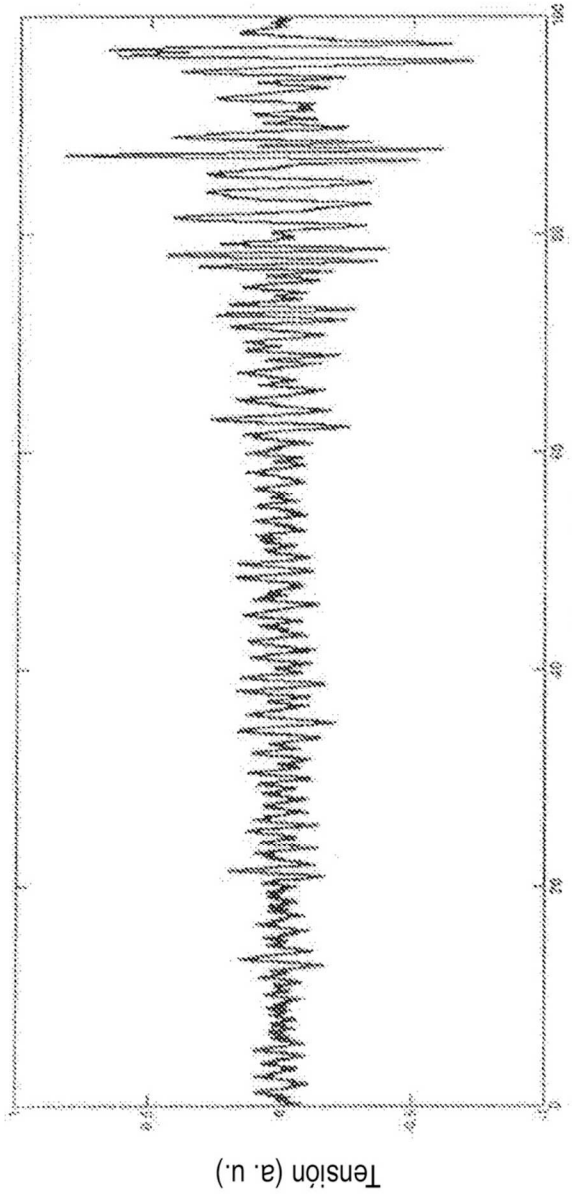


Fig. 14

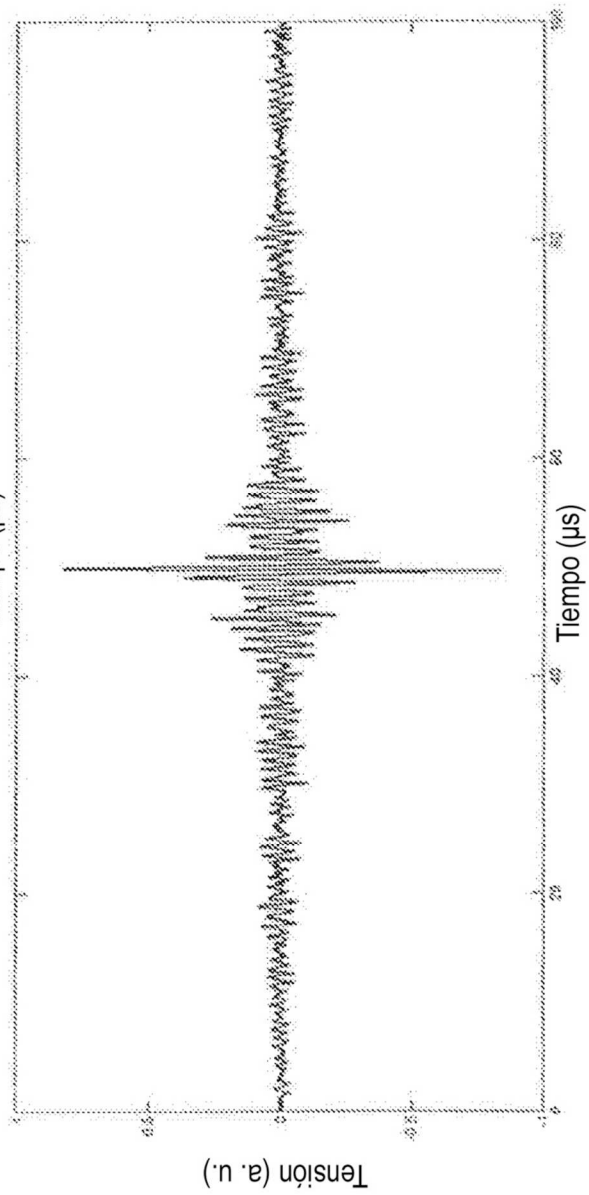


Fig. 15

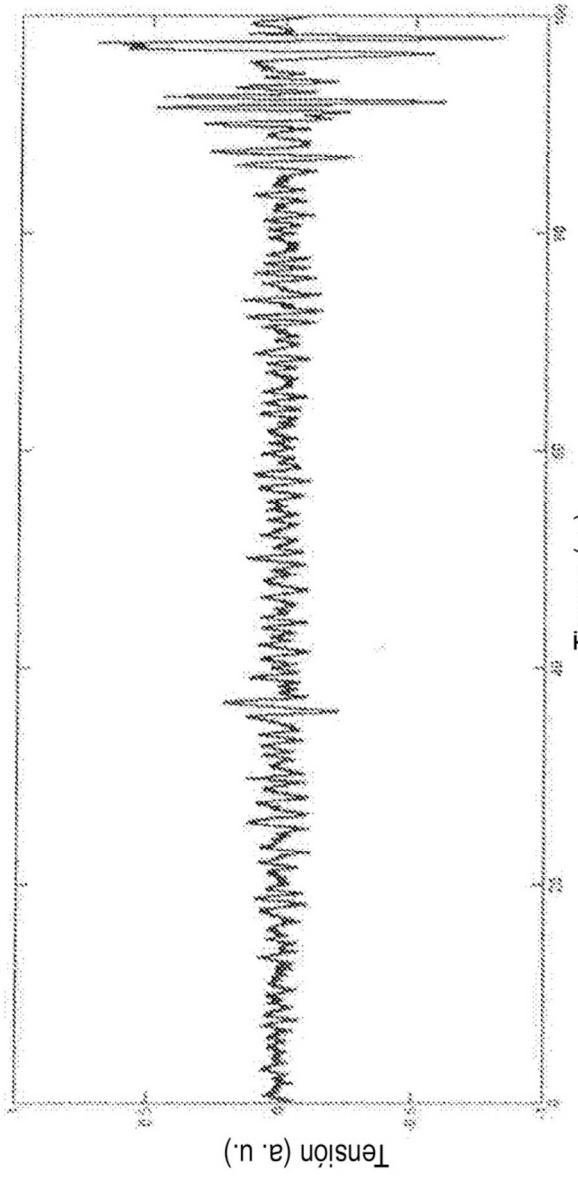


Fig. 16

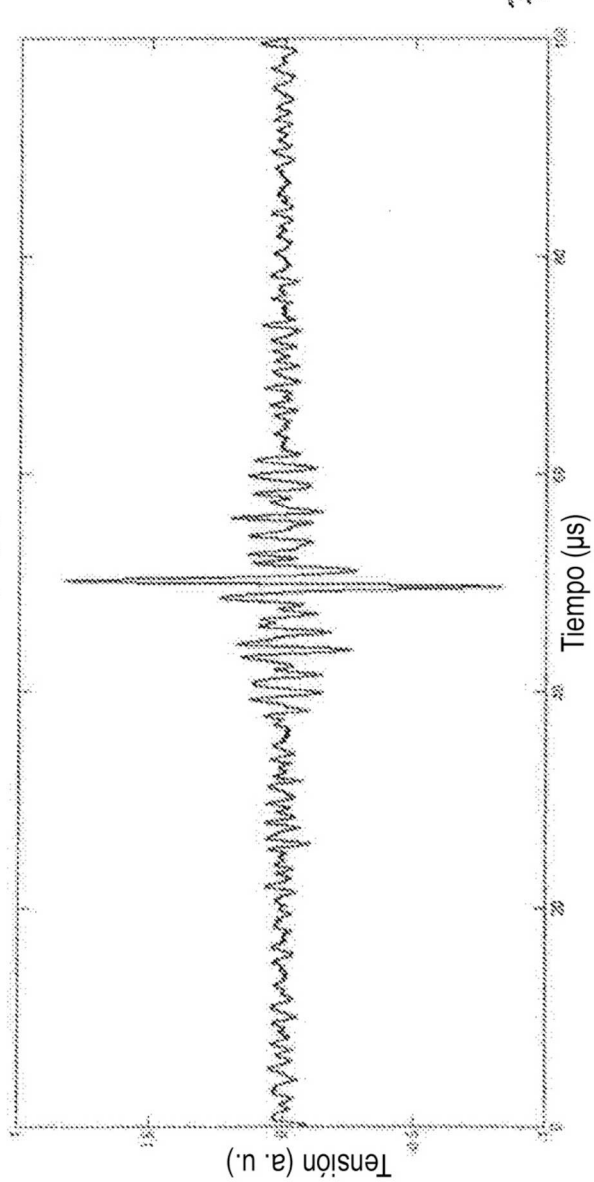


Fig. 17

Fig. 18

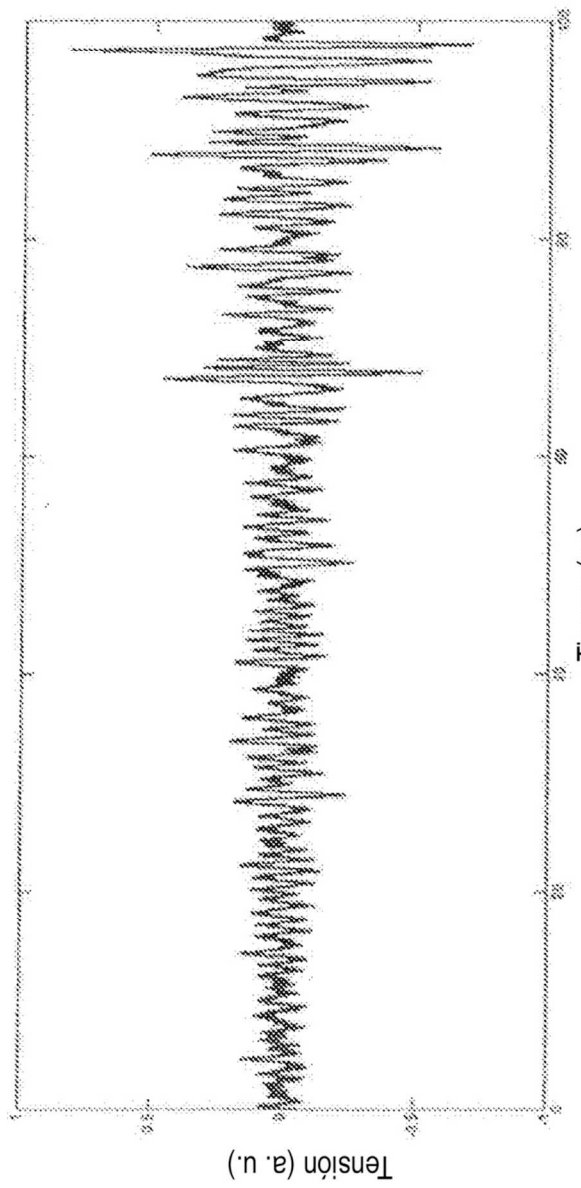


Fig. 19

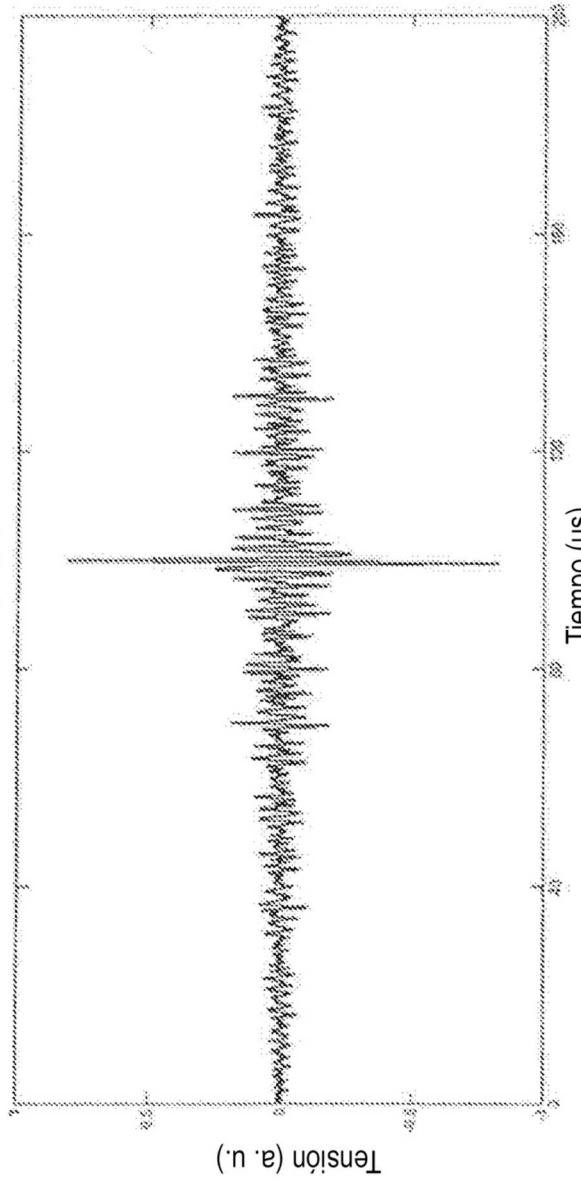


Fig. 20

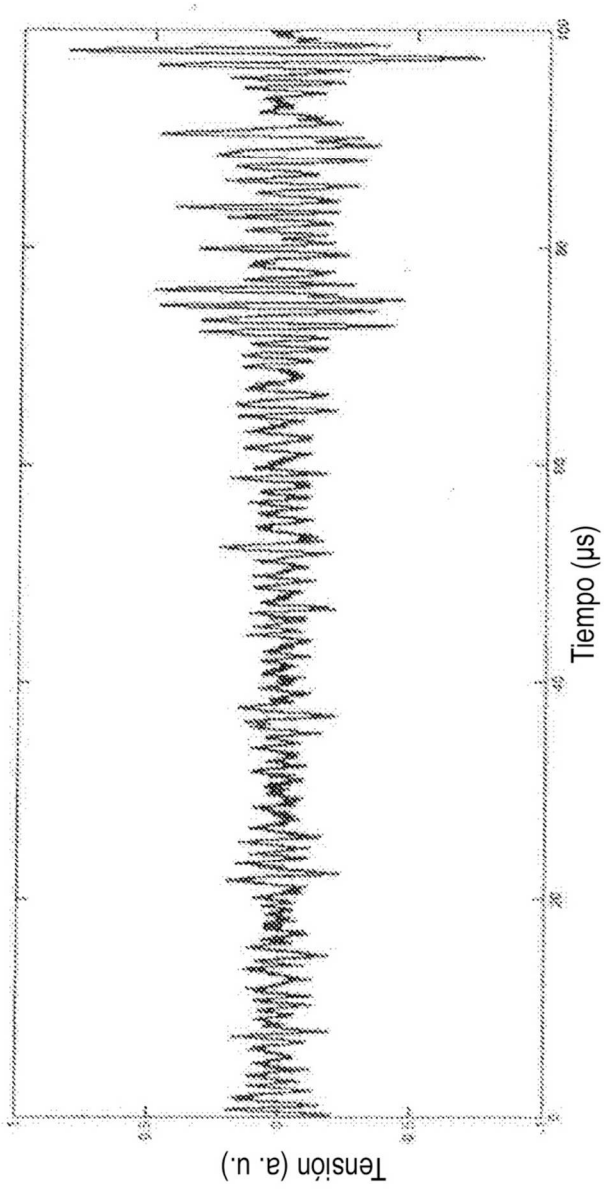
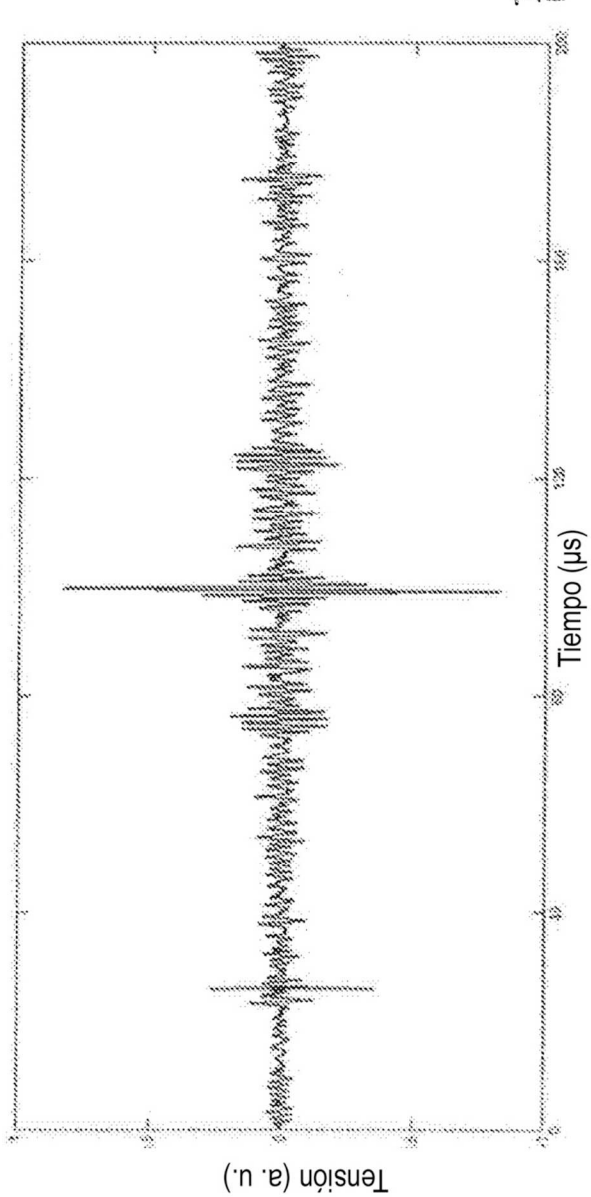


Fig. 21



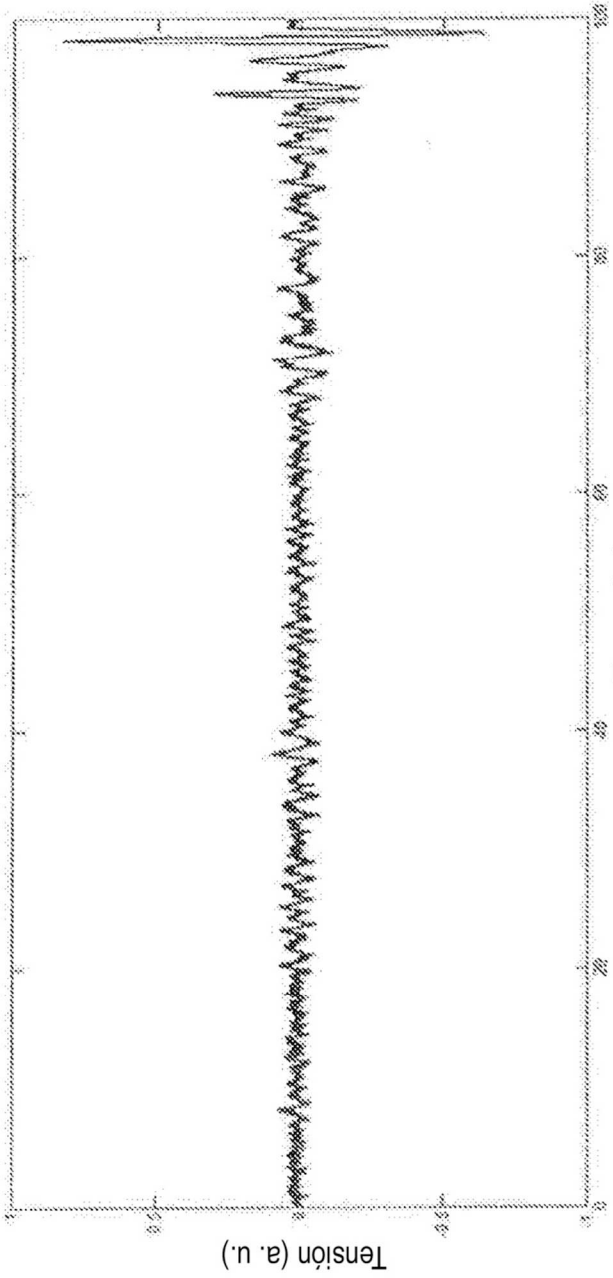


Fig. 22

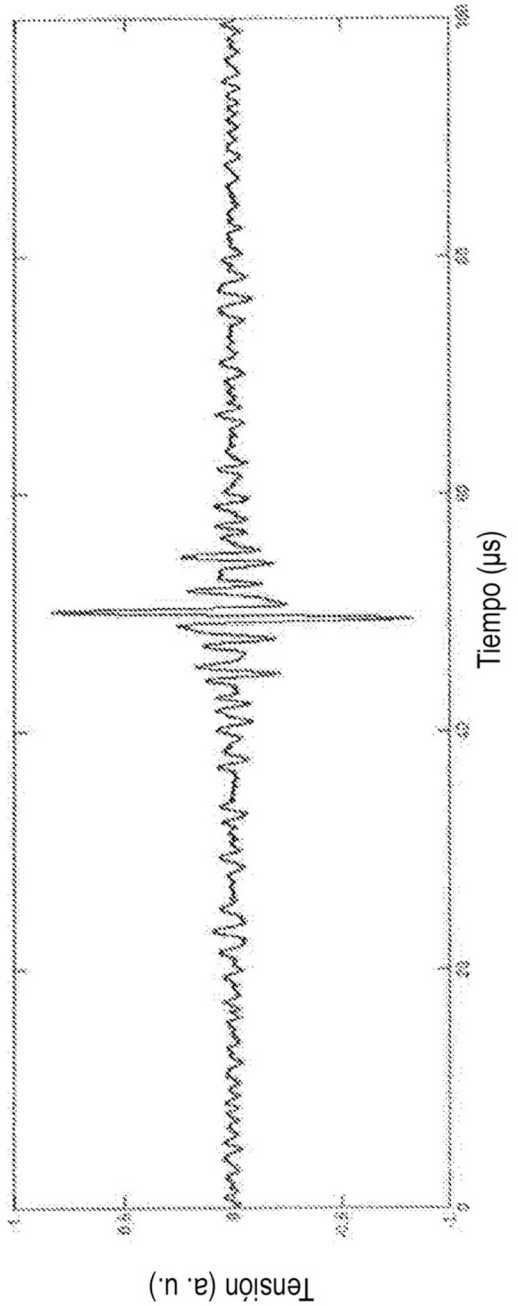


Fig. 23

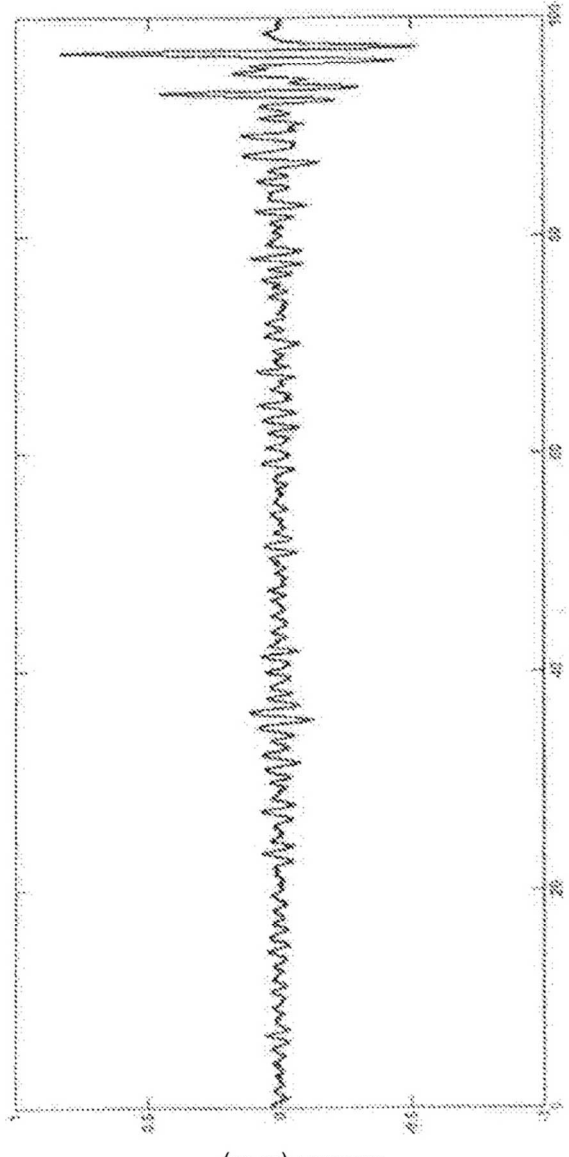


Fig. 24

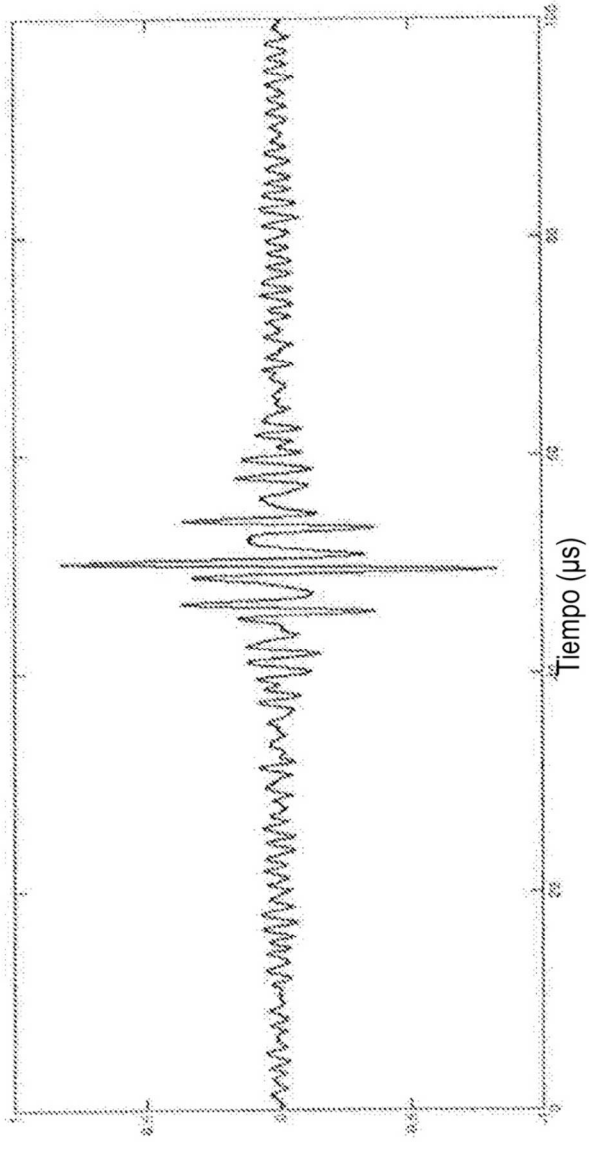


Fig. 25

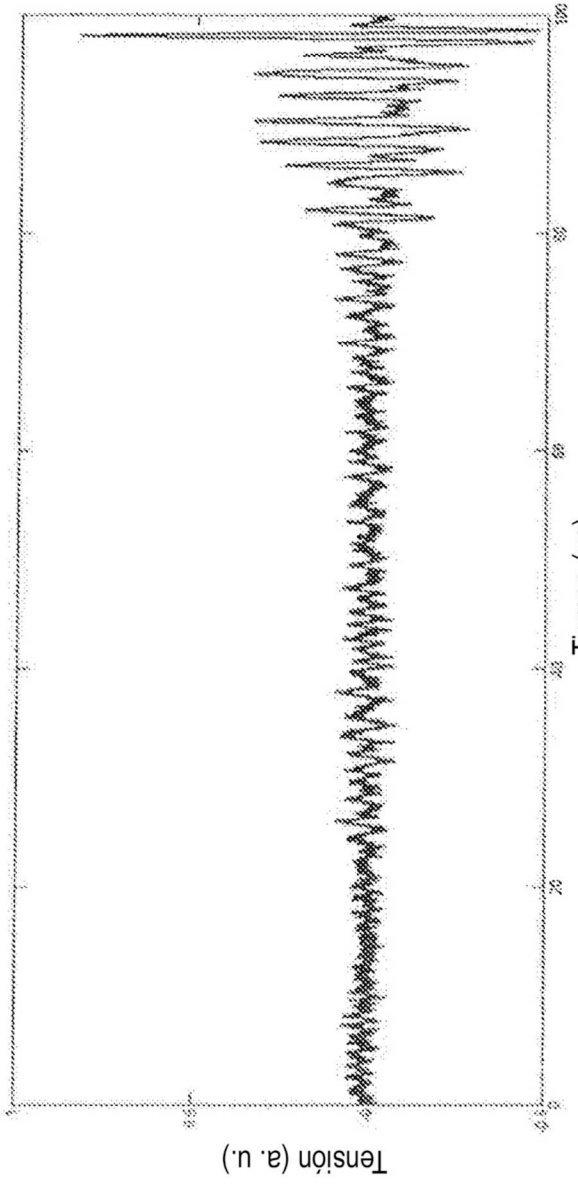


Fig. 26

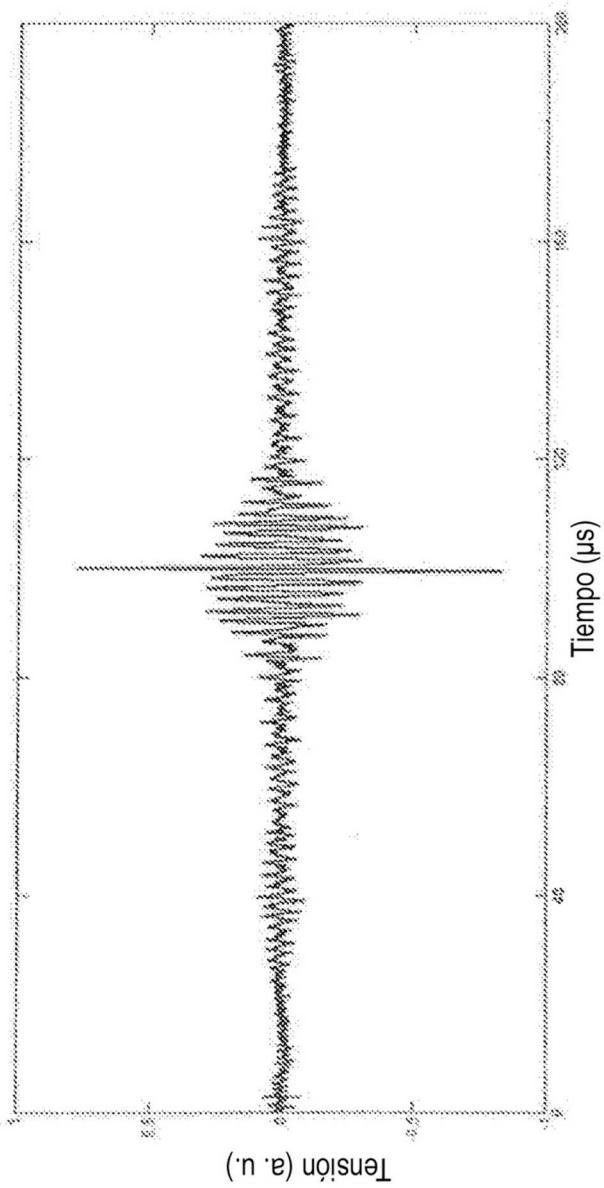


Fig. 27

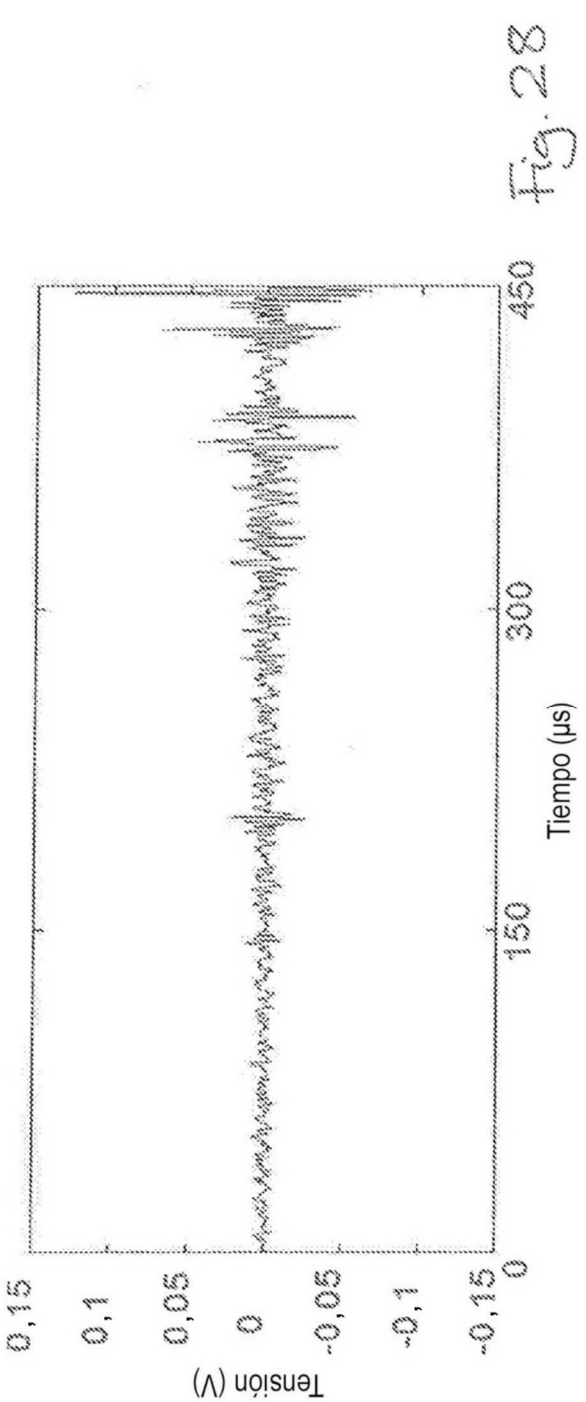

0,15
0,1
0,05
0
-0,05
-0,1
-0,15
Tensión (V)
0
150
300
450
Tiempo (µs)

Fig. 28

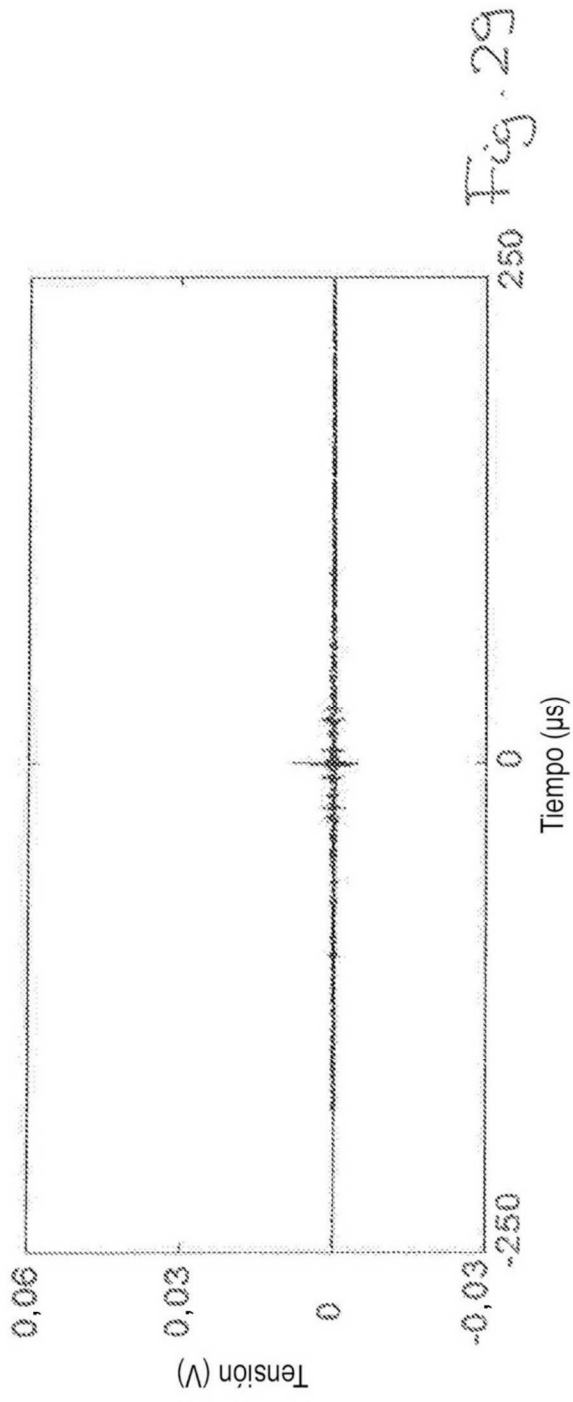

0,06
0,03
0
-0,03
Tensión (V)
-250
0
250
Tiempo (µs)

Fig. 29

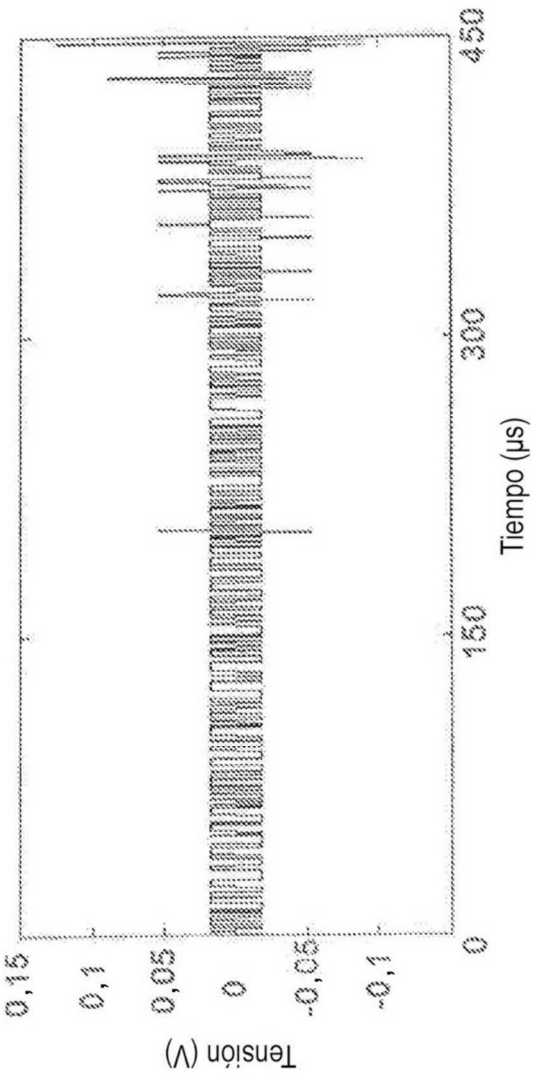

Tensión (V)
0,15
0,1
0,05
0
-0,05
-0,1
0
150
300
450
Tiempo (µs)

Fig. 30

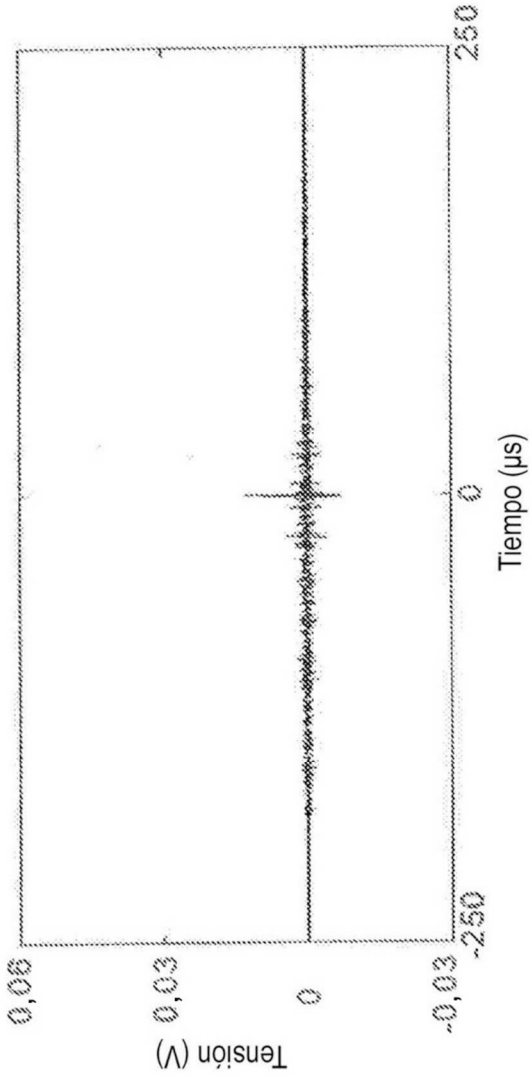

Tensión (V)
0,06
0,03
0
-0,03
-250
0
250
Tiempo (µs)

Fig. 31

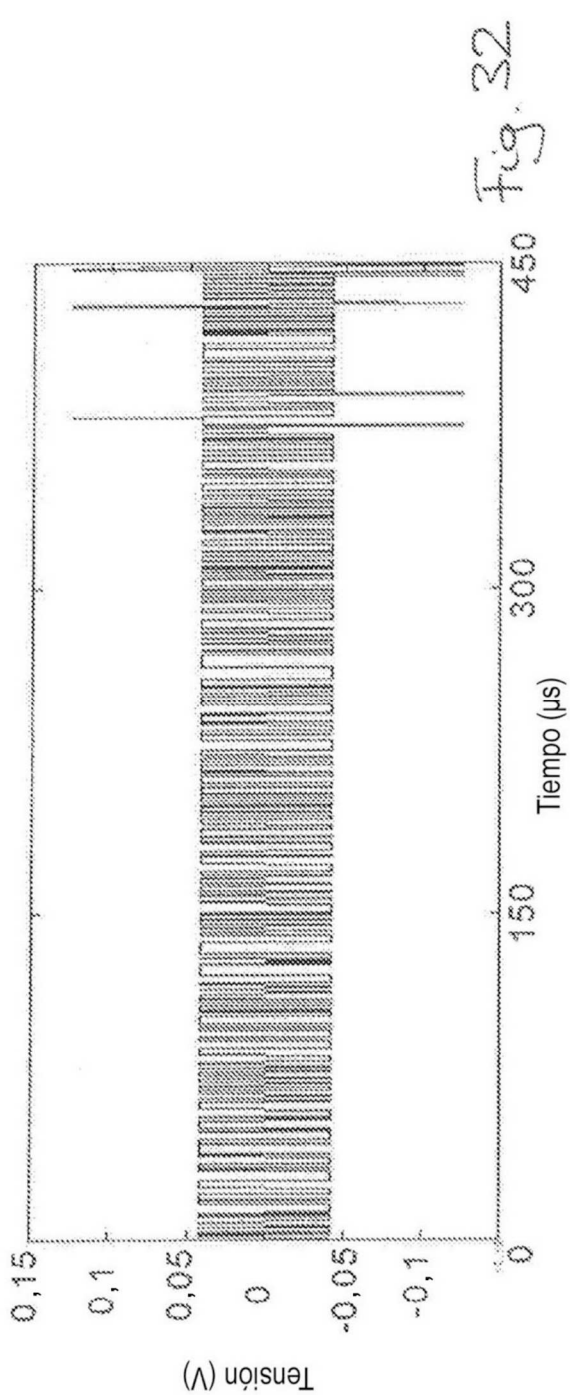

0,15
0,1
0,05
0
-0,05
-0,1
Tensión (V)
0
150
300
450
Tiempo (µs)

Fig. 32

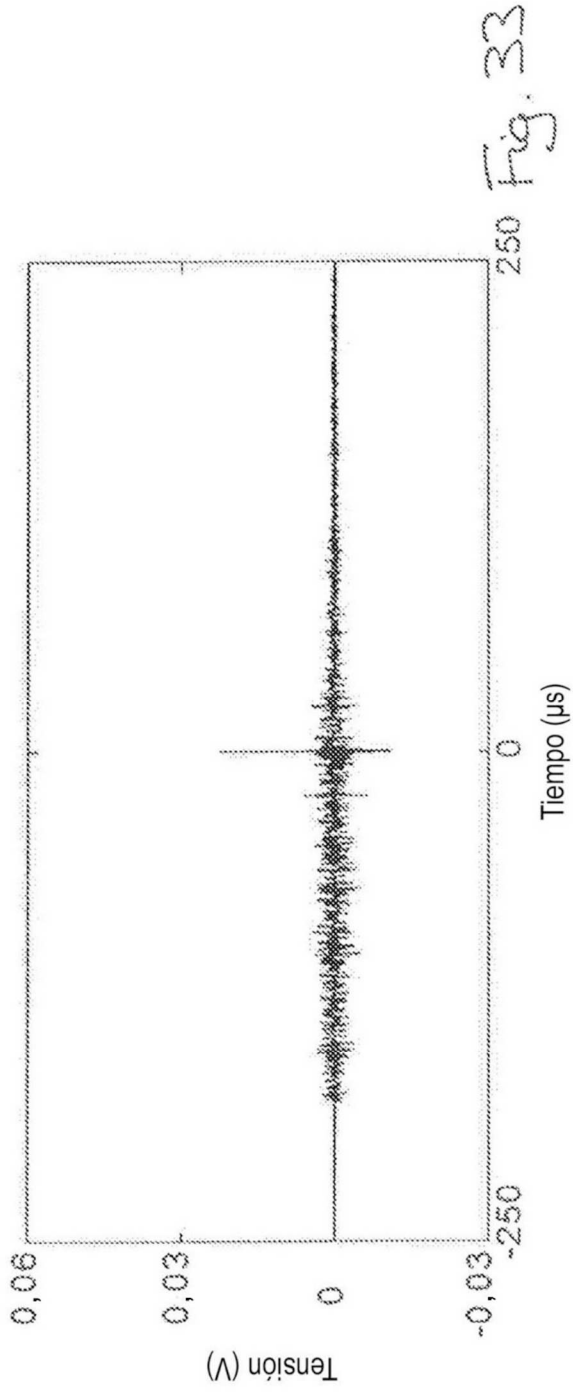

0,06
0,03
0
-0,03
Tensión (V)
-250
0
250
Tiempo (µs)

Fig. 33

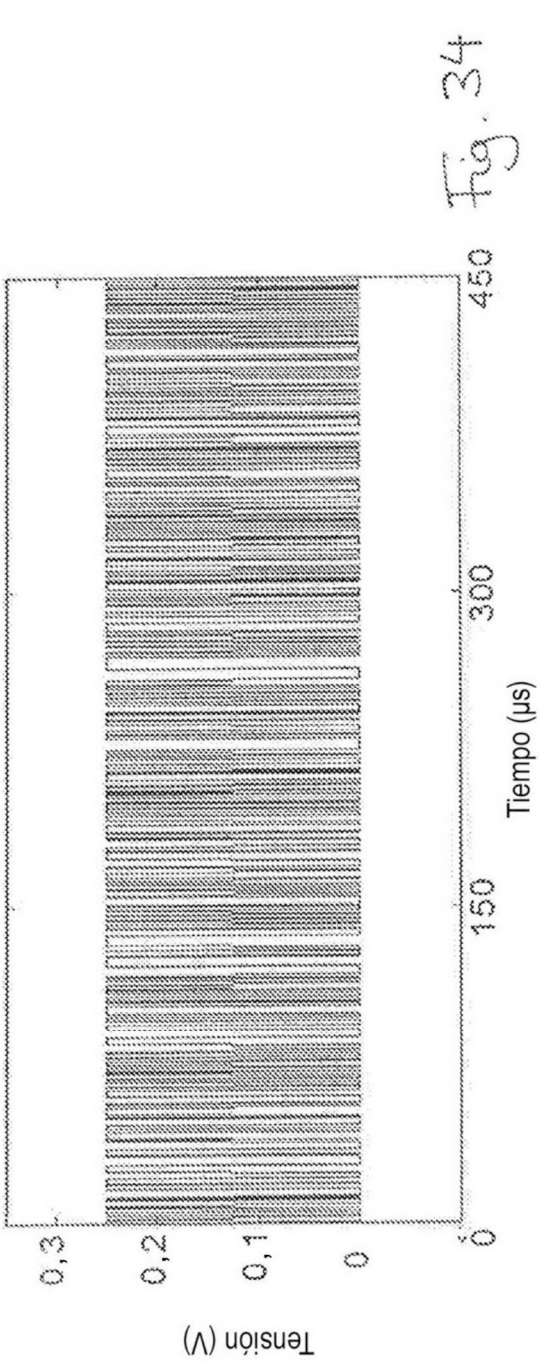

Tensión (V)
0,3
0,2
0,1
0
0
150
300
450
Tiempo (µs)

Fig. 34

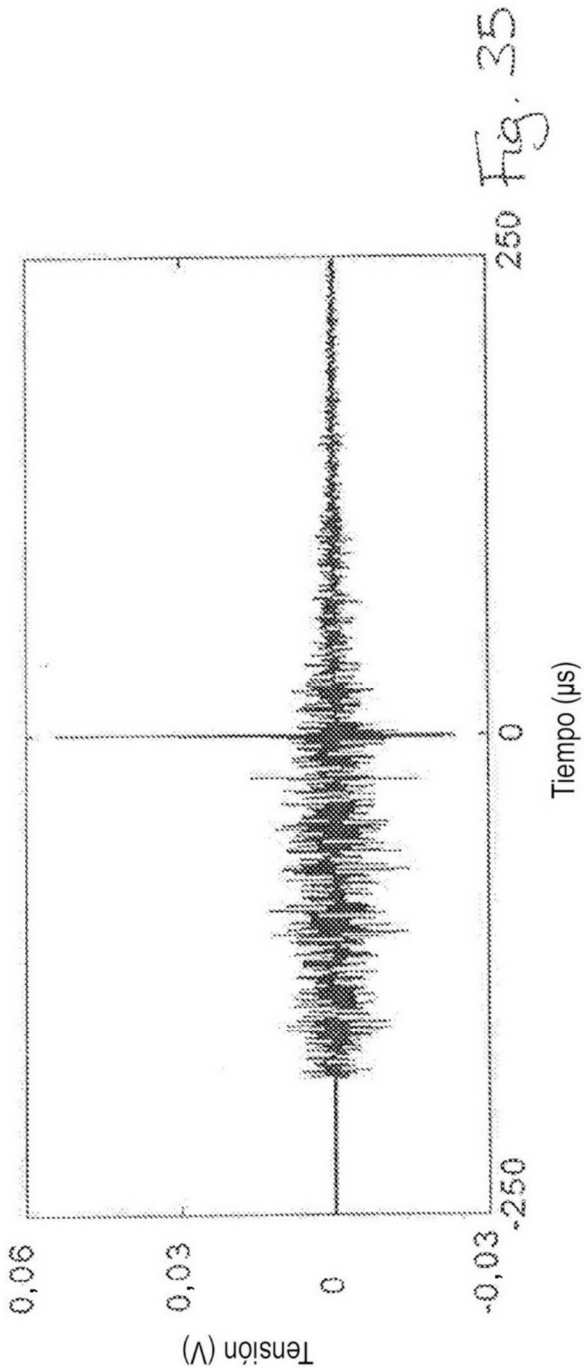

Tensión (V)
0,06
0,03
0
-0,03
-250
0
250
Tiempo (µs)

Fig. 35

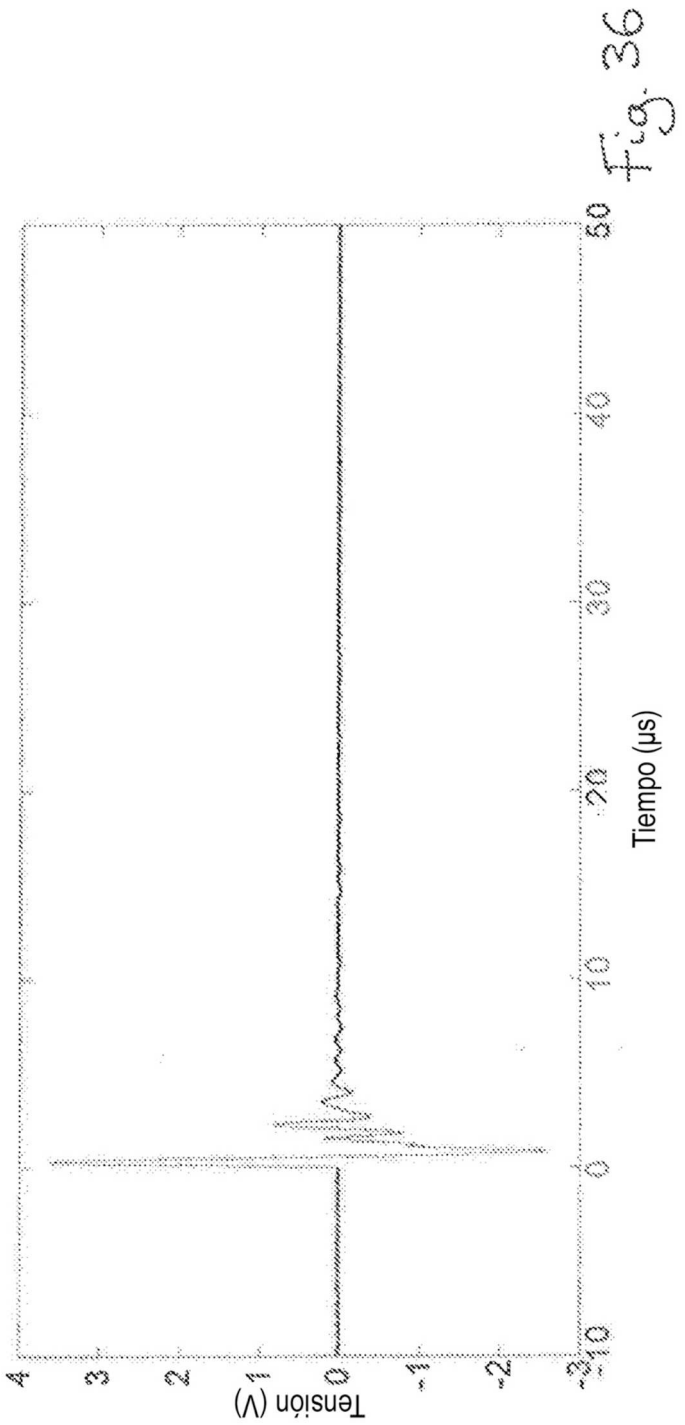


Fig. 36

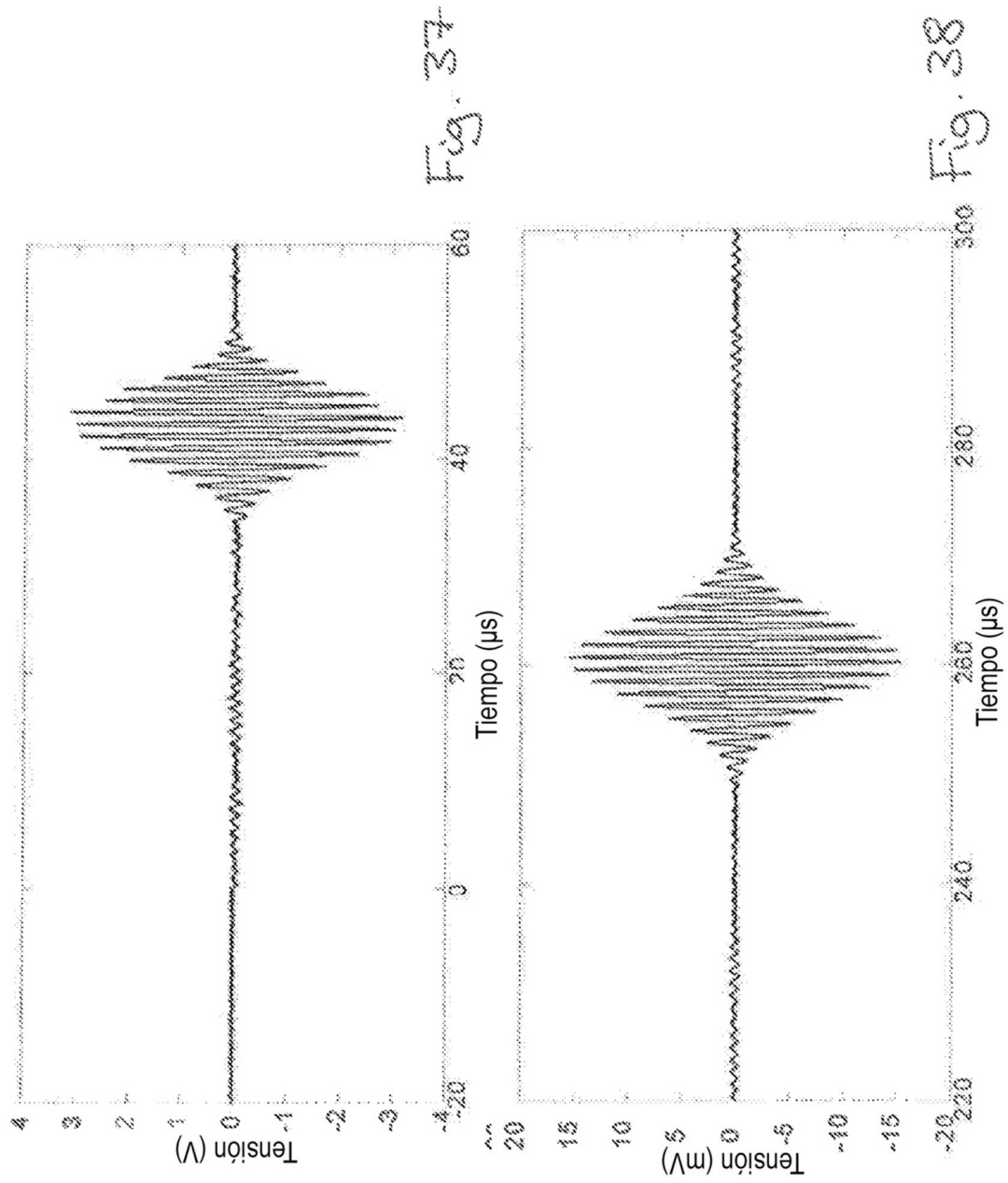


Fig. 37

Fig. 38

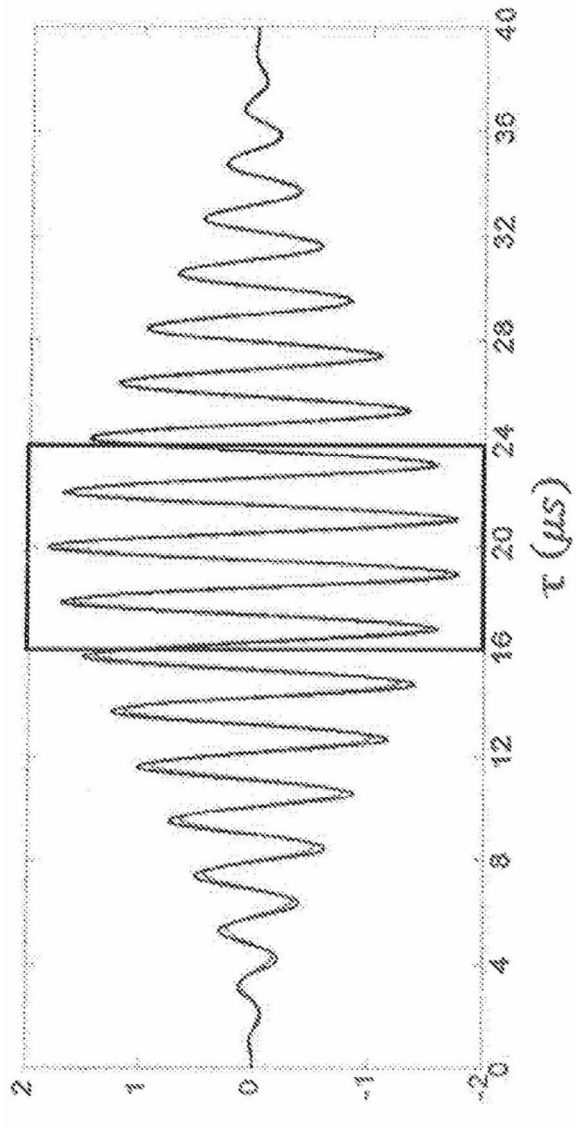


Fig. 39

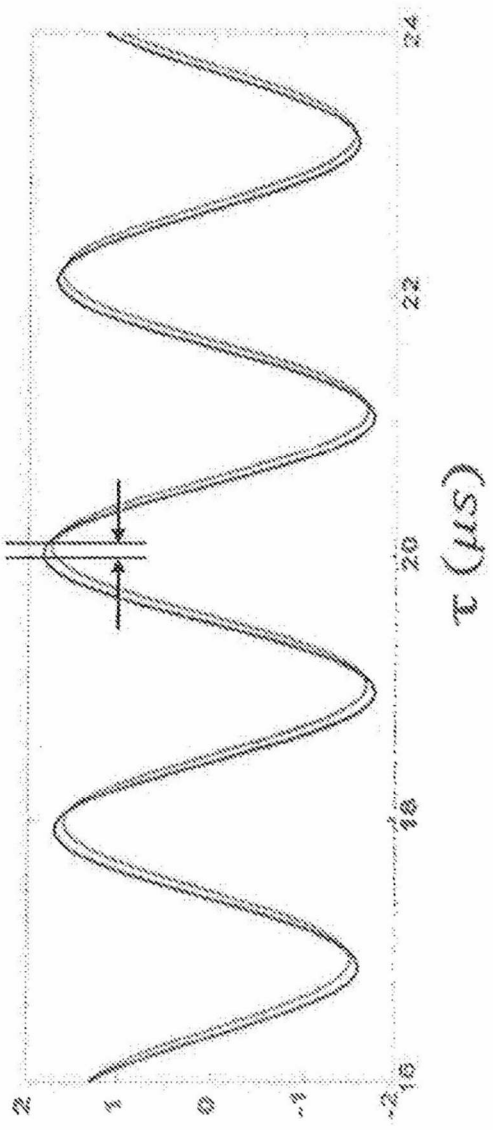


Fig. 40

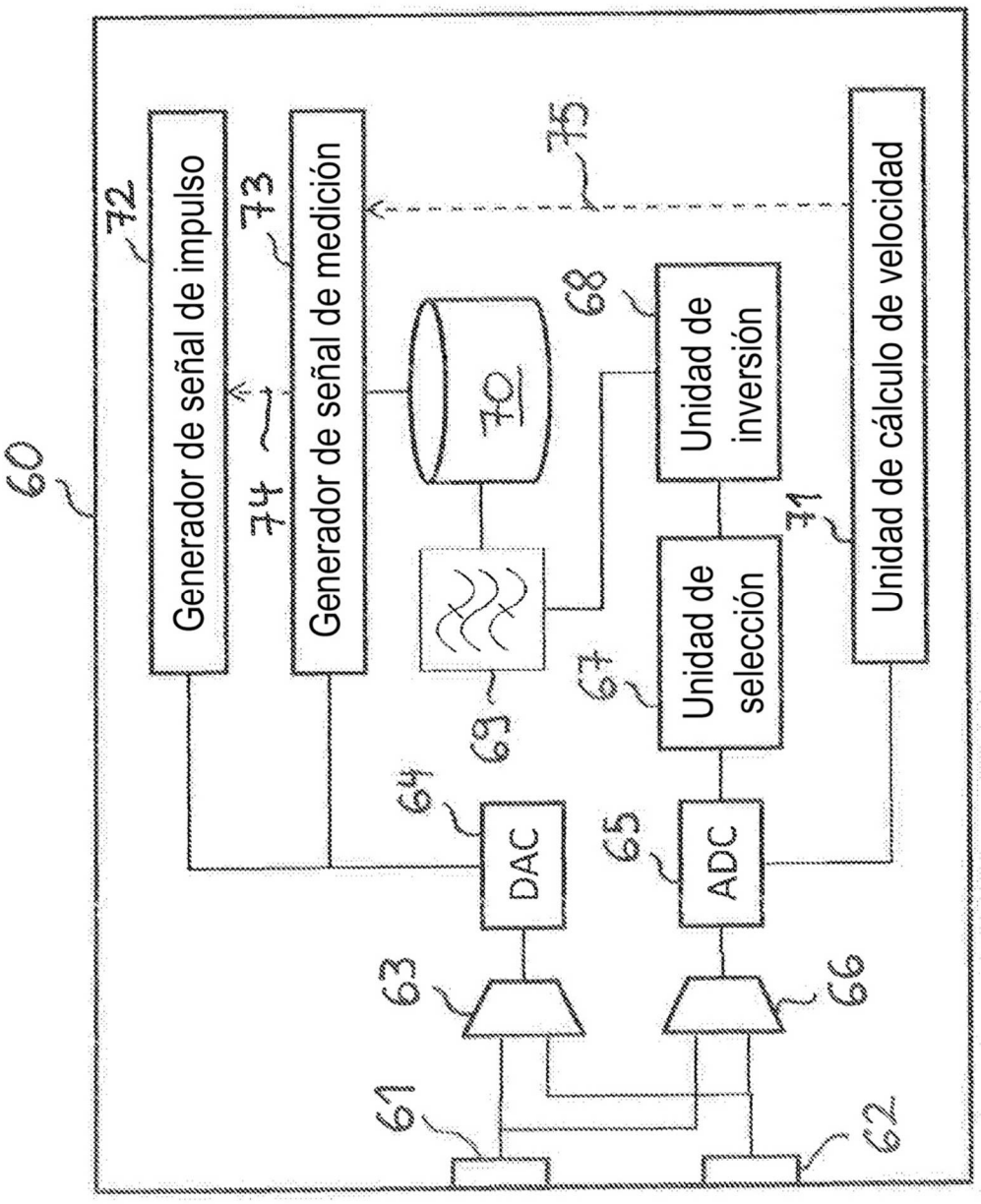

60
72
Generador de señal de impulso
73
Generador de señal de medición
74
75
70
68
Unidad de inversión
71
Unidad de cálculo de velocidad
69
64
Unidad de selección
64
DAC
65
ADC
63
66
61
62

Fig. 41

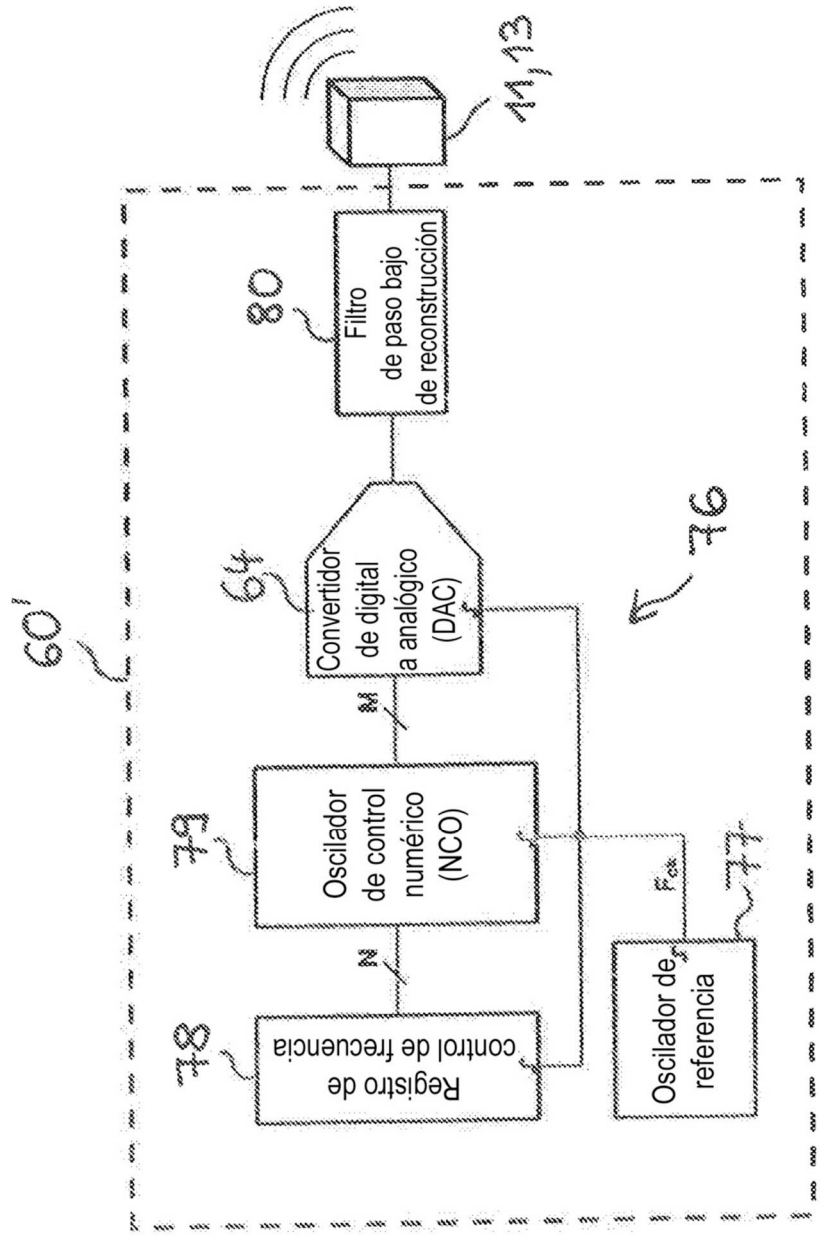

60'
11,13
80
Filtro de paso bajo de reconstrucción
64
Convertidor de digital a analógico (DAC)
76
M
79
Oscilador de control numérico (NCO)
N
78
Registro de control de frecuencia
Fclk
77
Oscilador de referencia

Fig. 42

Fig. 43

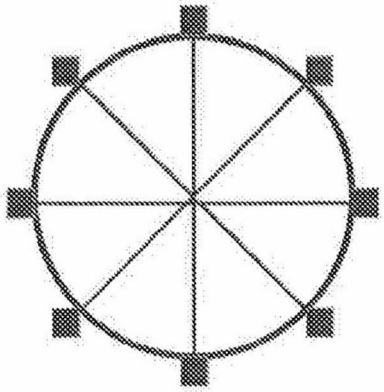
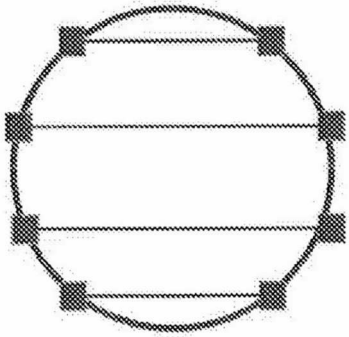


Fig. 44



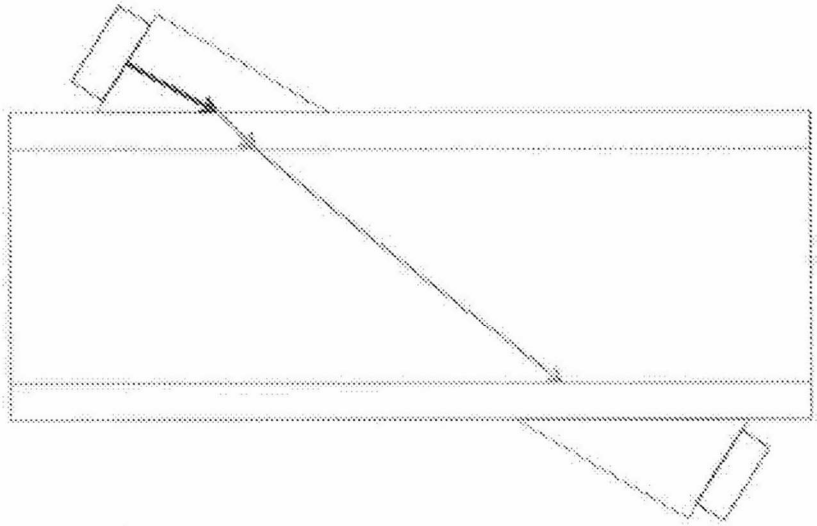


Fig. 45

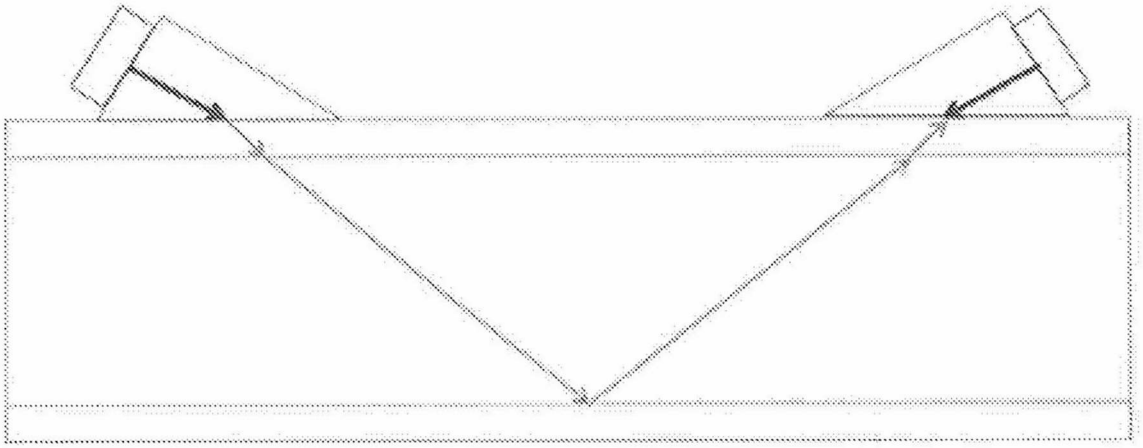


Fig. 46

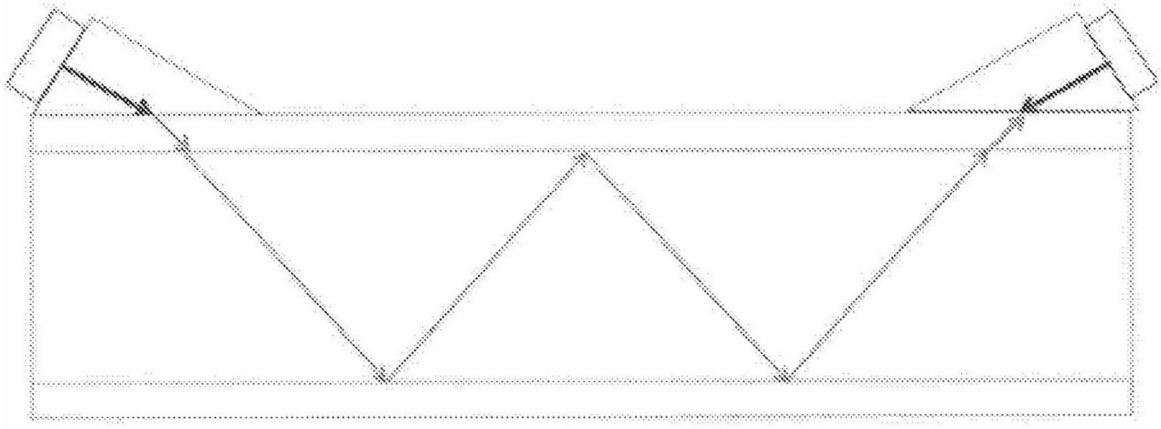


Fig. 47

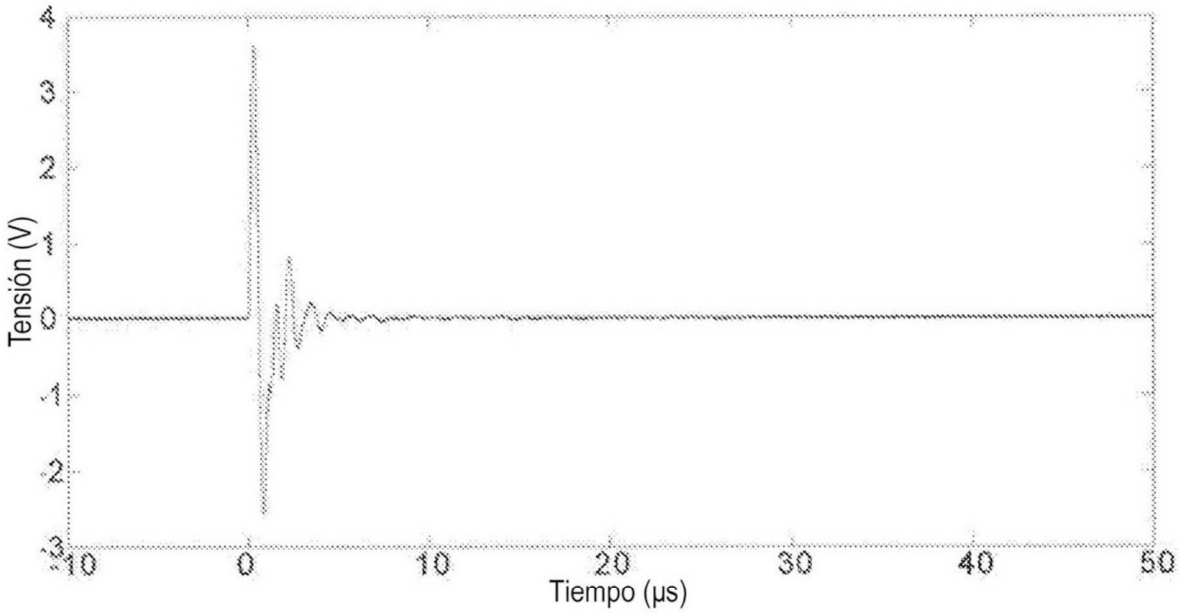

Tensión (V)
Tiempo (µs)
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-10
0
10
20
30
40
50

Fig. 48

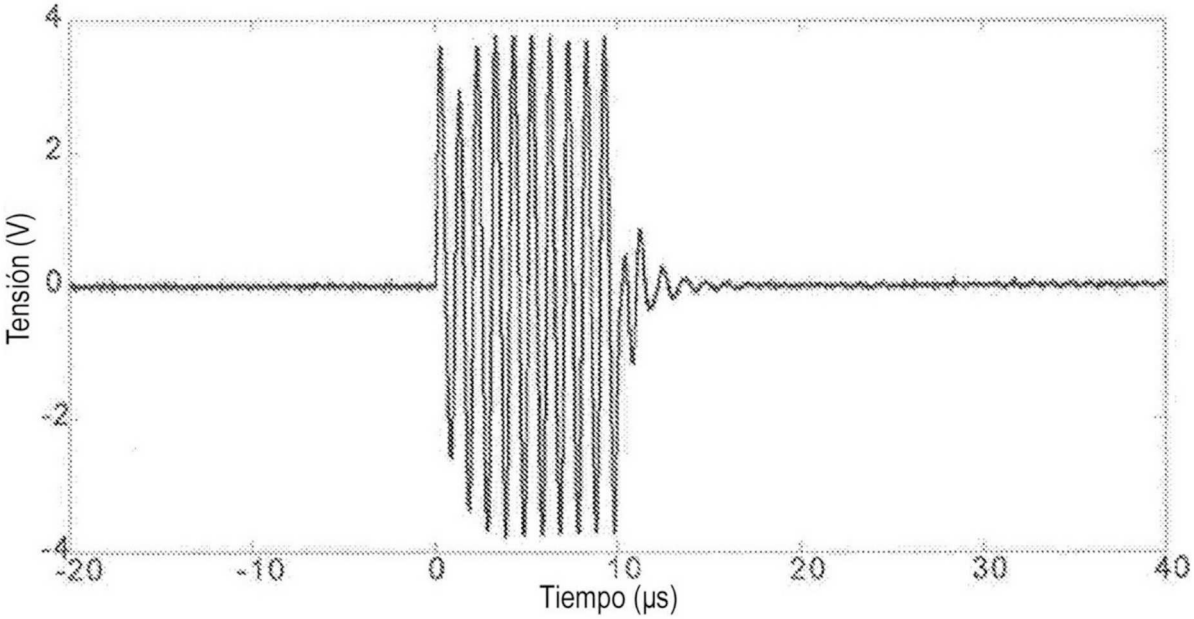

Tensión (V)
Tiempo (µs)
4
2
0
-2
-4
-20
-10
0
10
20
30
40

Fig. 49

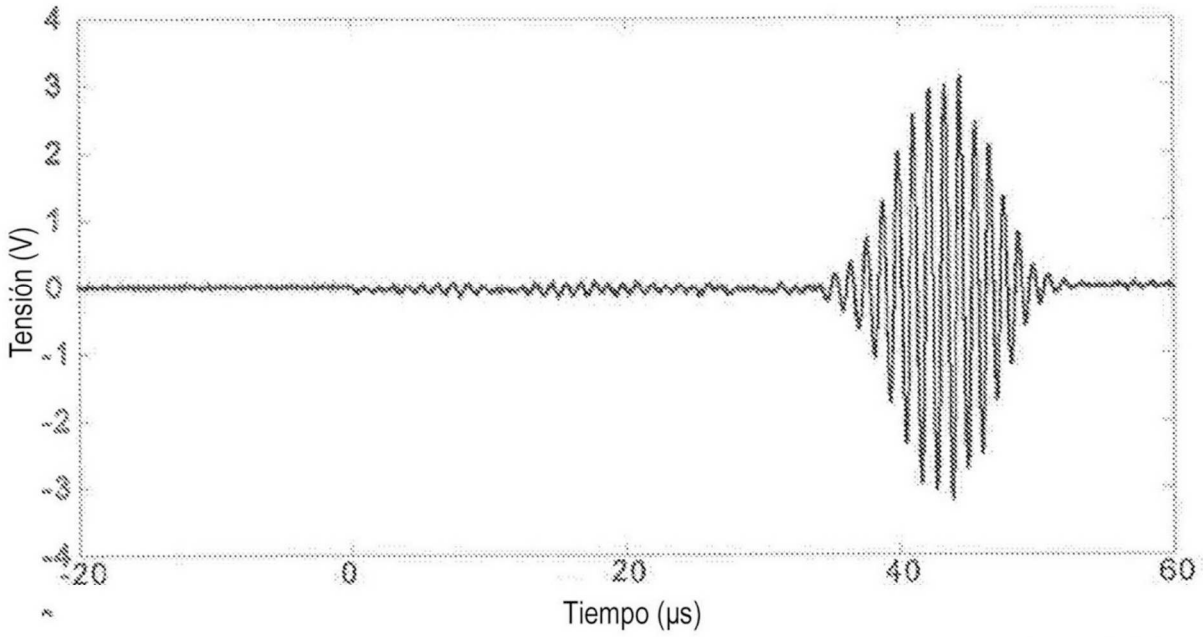

Tensión (V)
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-20
0
20
40
60
Tiempo (µs)

Fig. 50

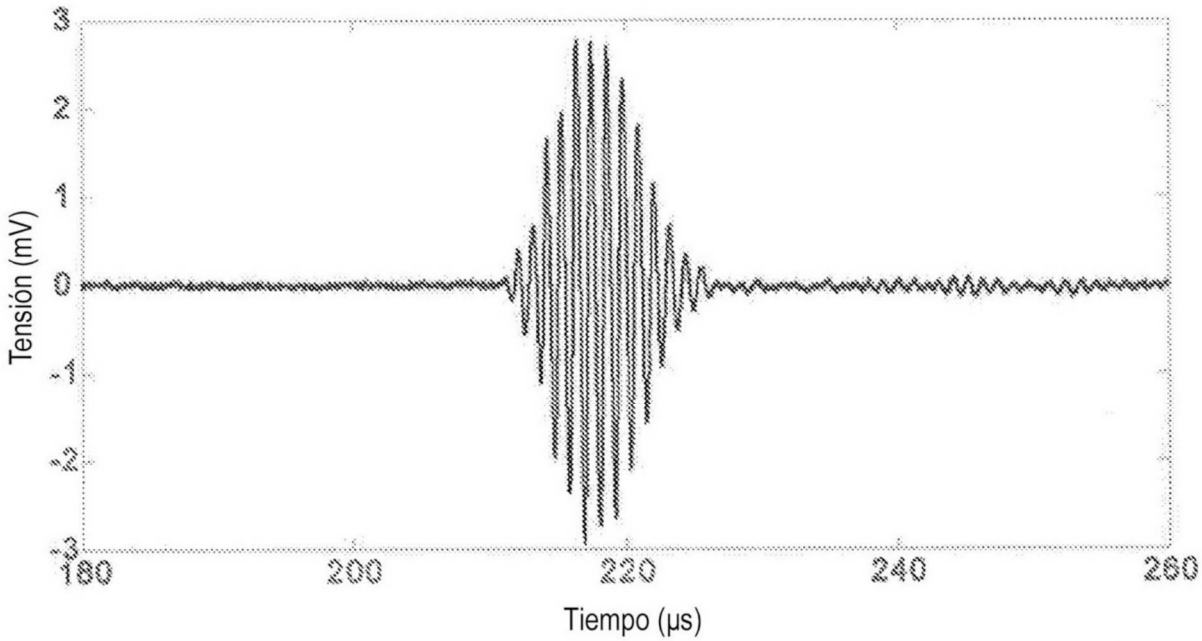

Tensión (mV)
3
2
1
0
-1
-2
-3
180
200
220
240
260
Tiempo (µs)

Fig. 51

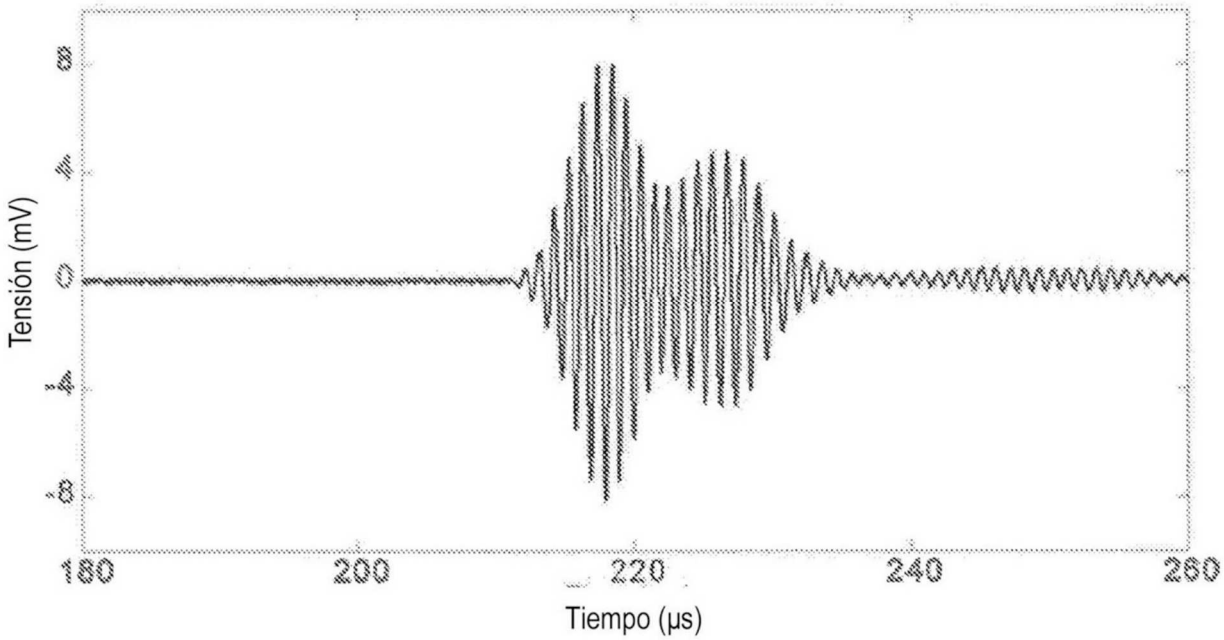

8
4
0
-4
-8
Tensión (mV)
180
200
220
240
260
Tiempo (µs)

Fig. 52

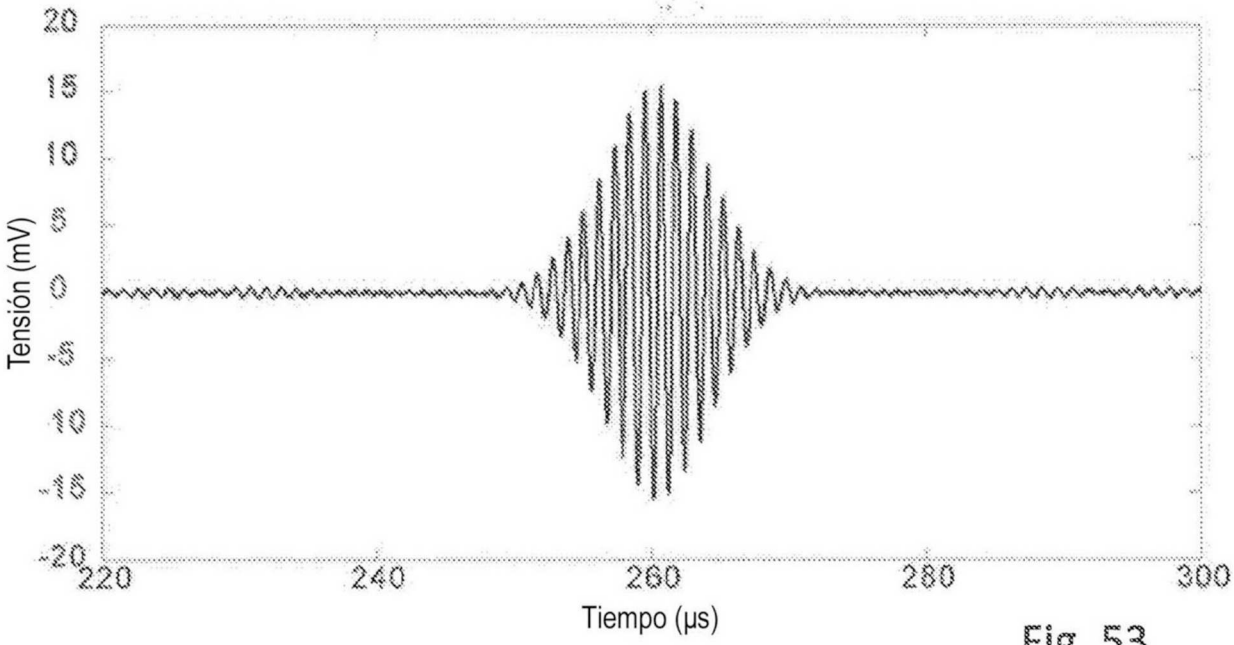

20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
Tensión (mV)
220
240
260
280
300
Tiempo (µs)

Fig. 53

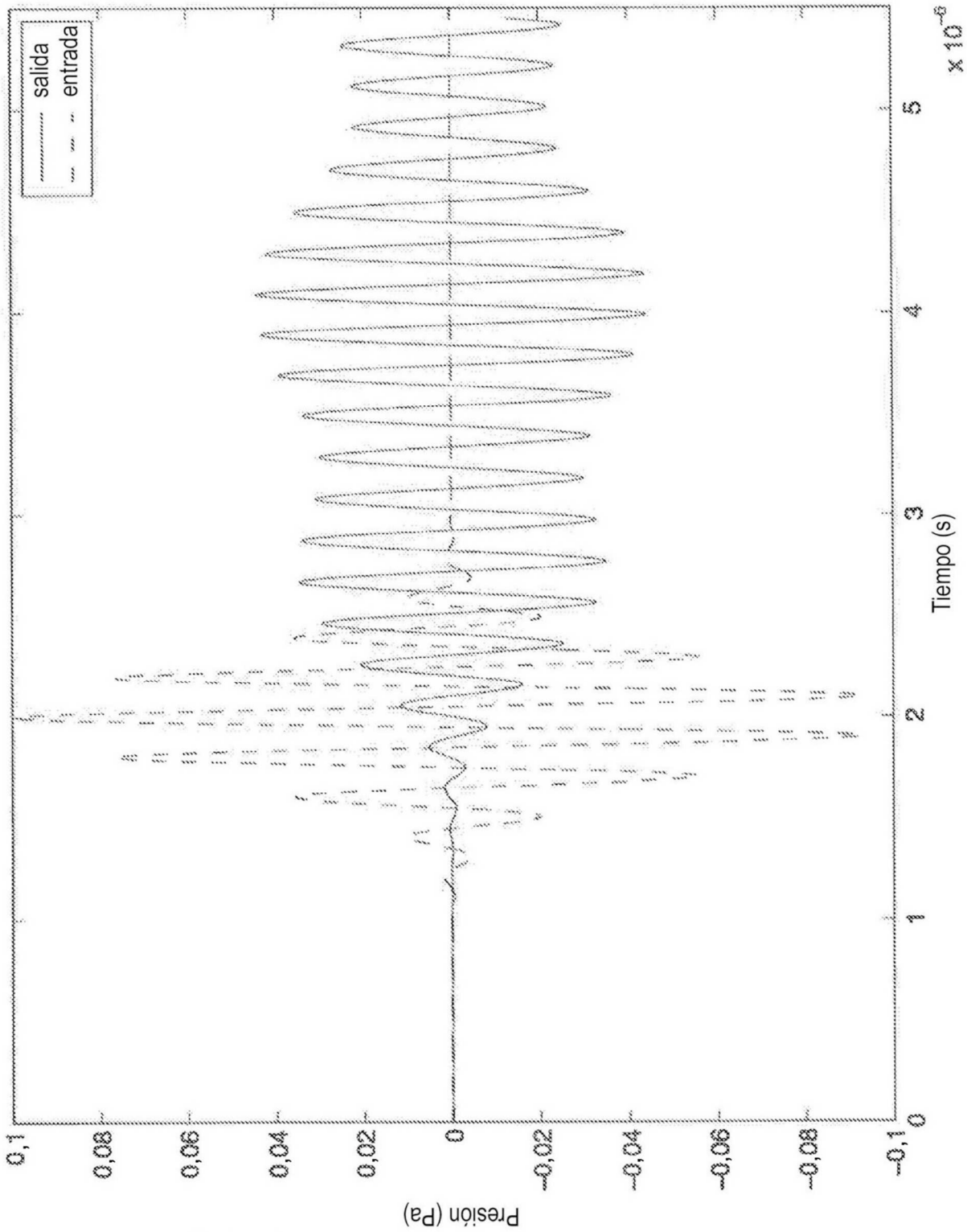

salida
entrada
Presión (Pa)
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
−0,02
−0,04
−0,06
−0,08
−0,1
0
1
2
3
4
5
x 10⁻⁶
Tiempo (s)

Fig. 54

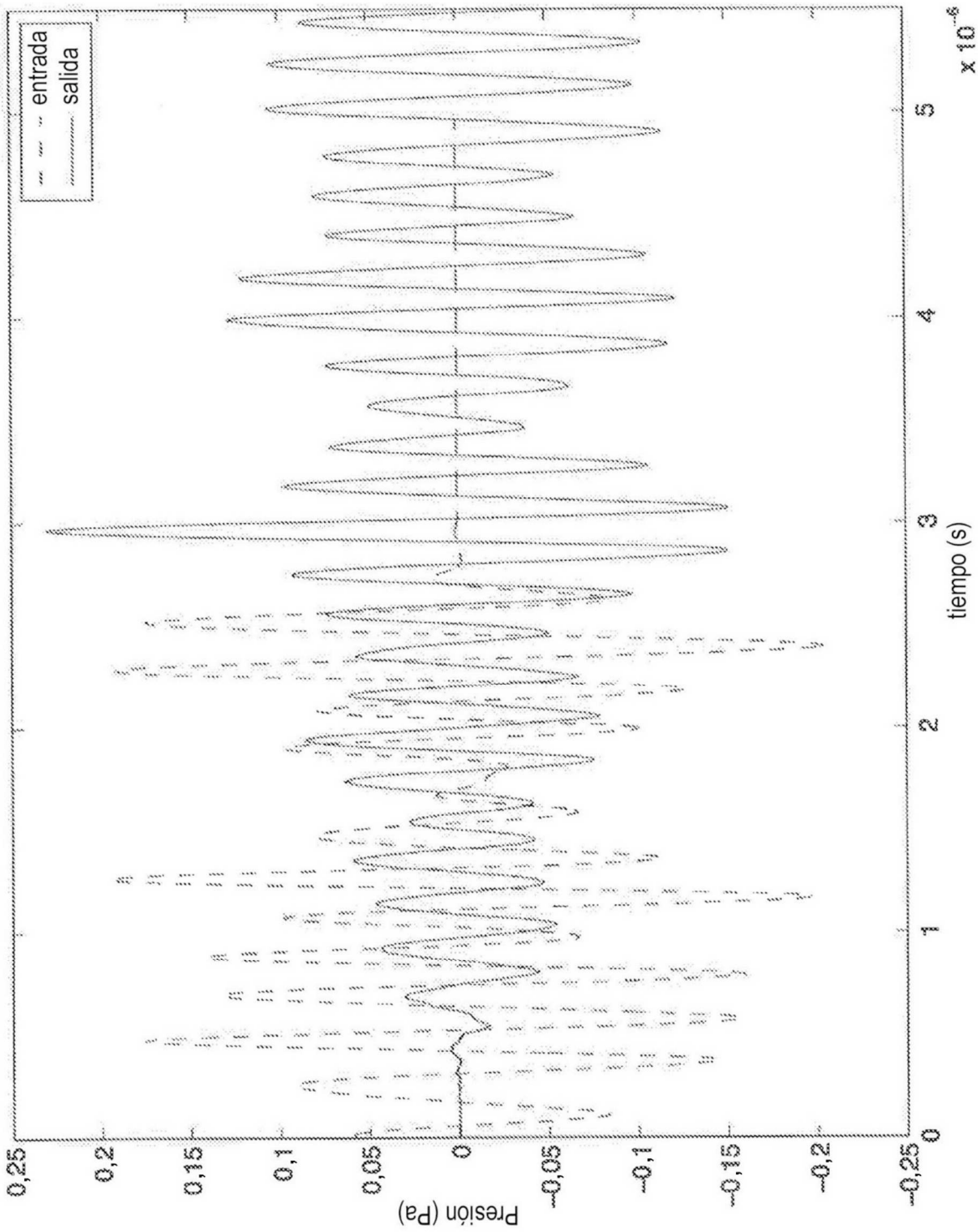
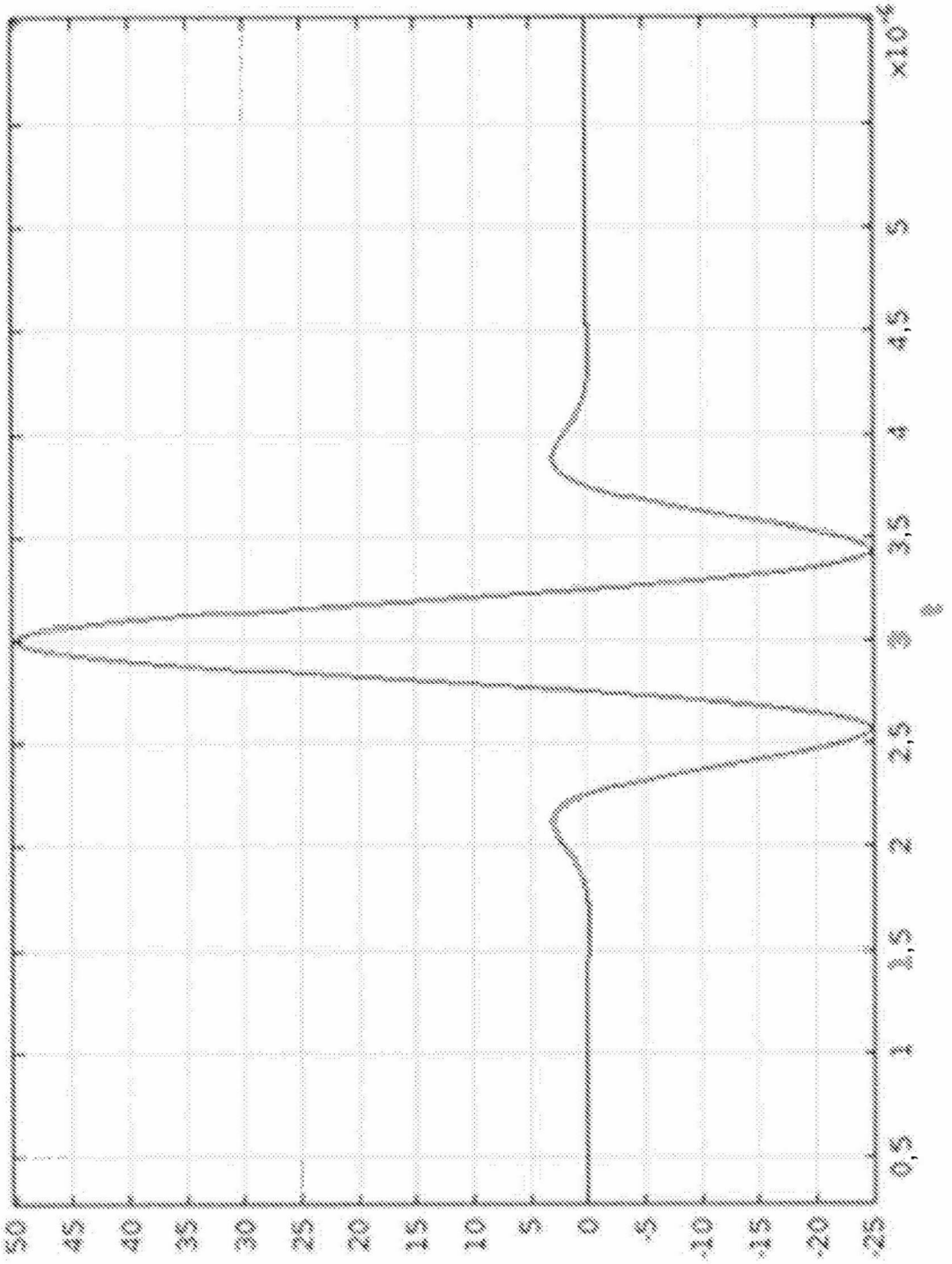

entrada
salida
Presión (Pa)
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
−0,05
−0,1
−0,15
−0,2
−0,25
0
1
2
3
4
5
x 10⁻⁴
tiempo (s)

Fig. 55

Fig. 56



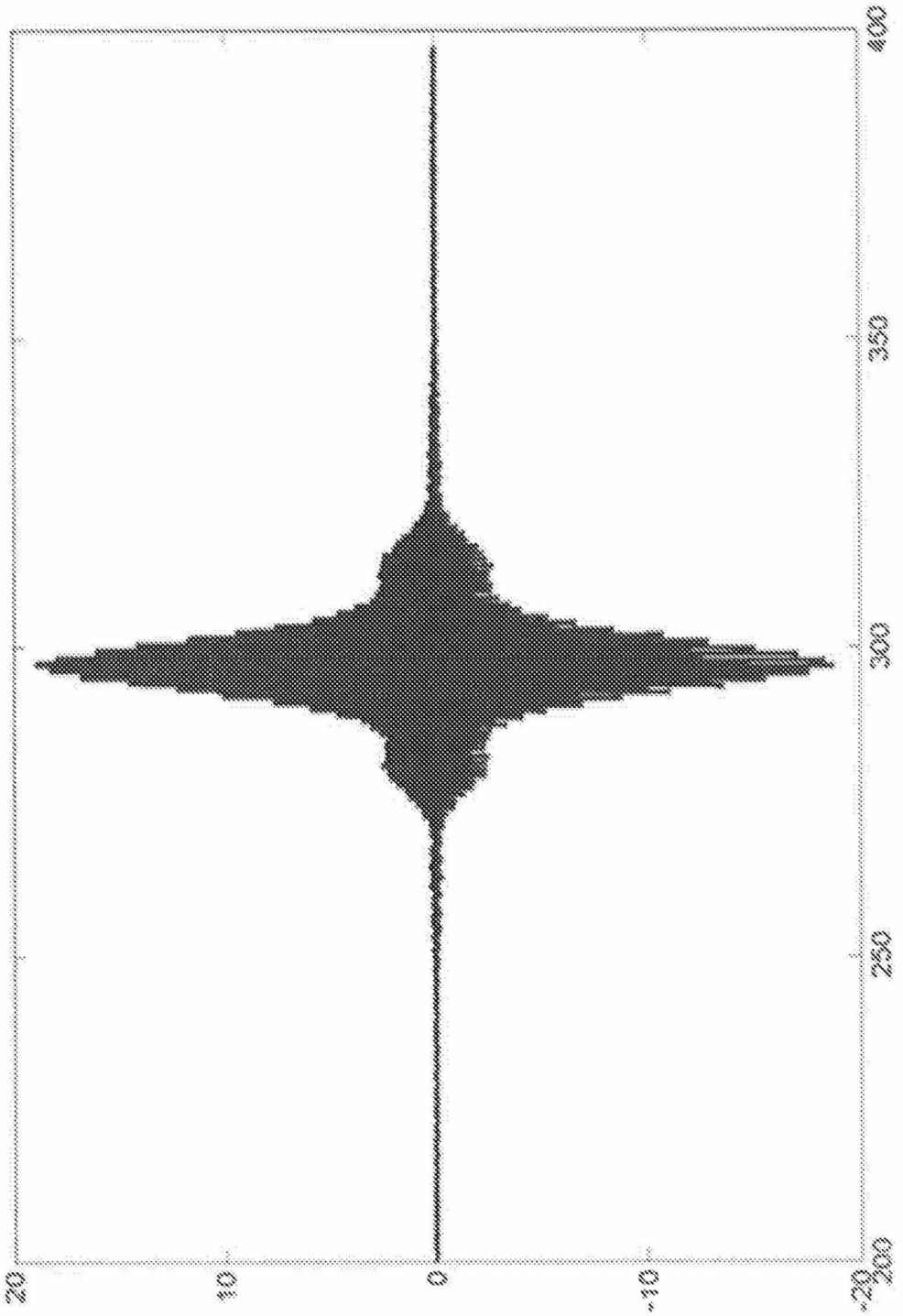


Fig. 57

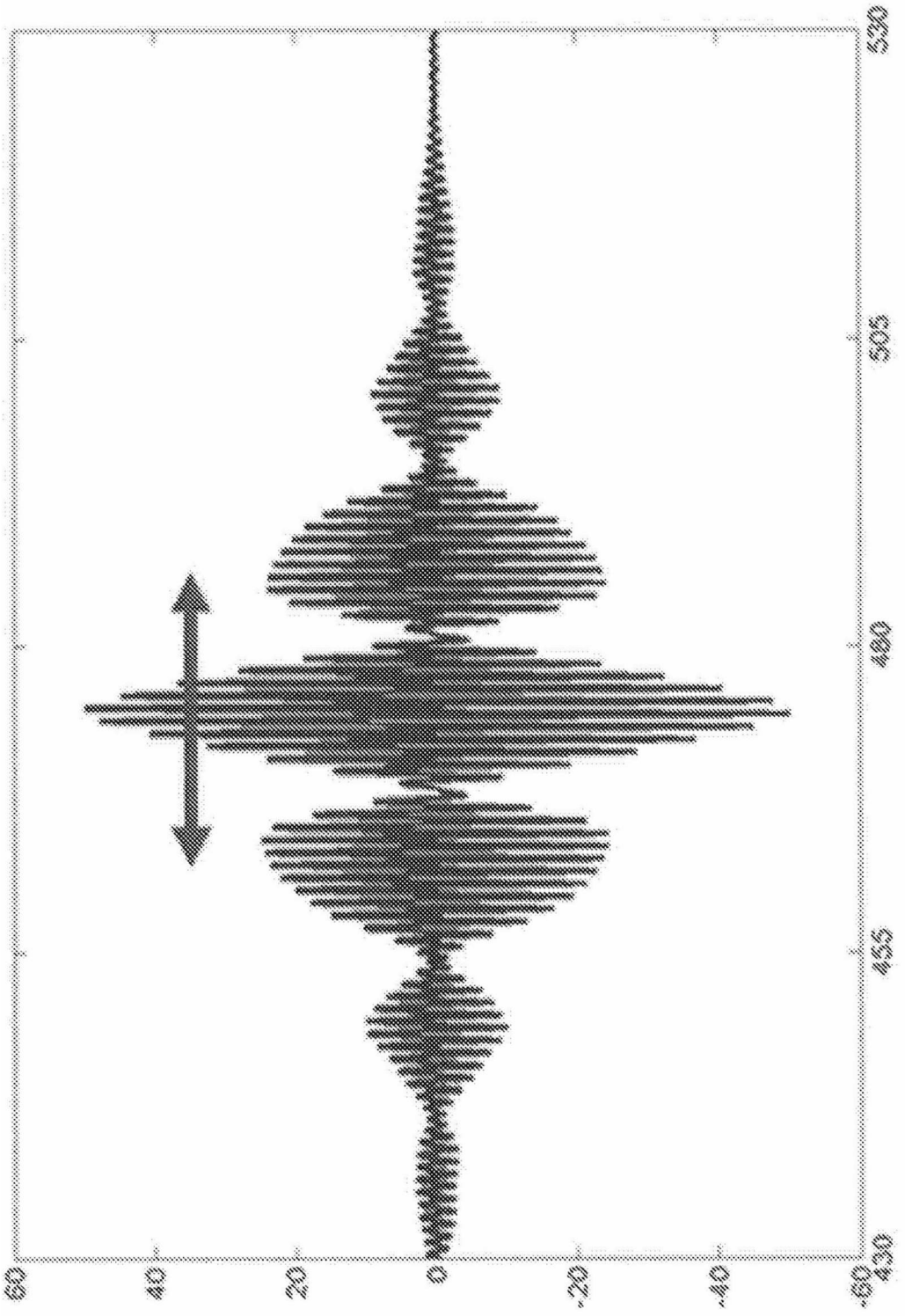


Fig. 58

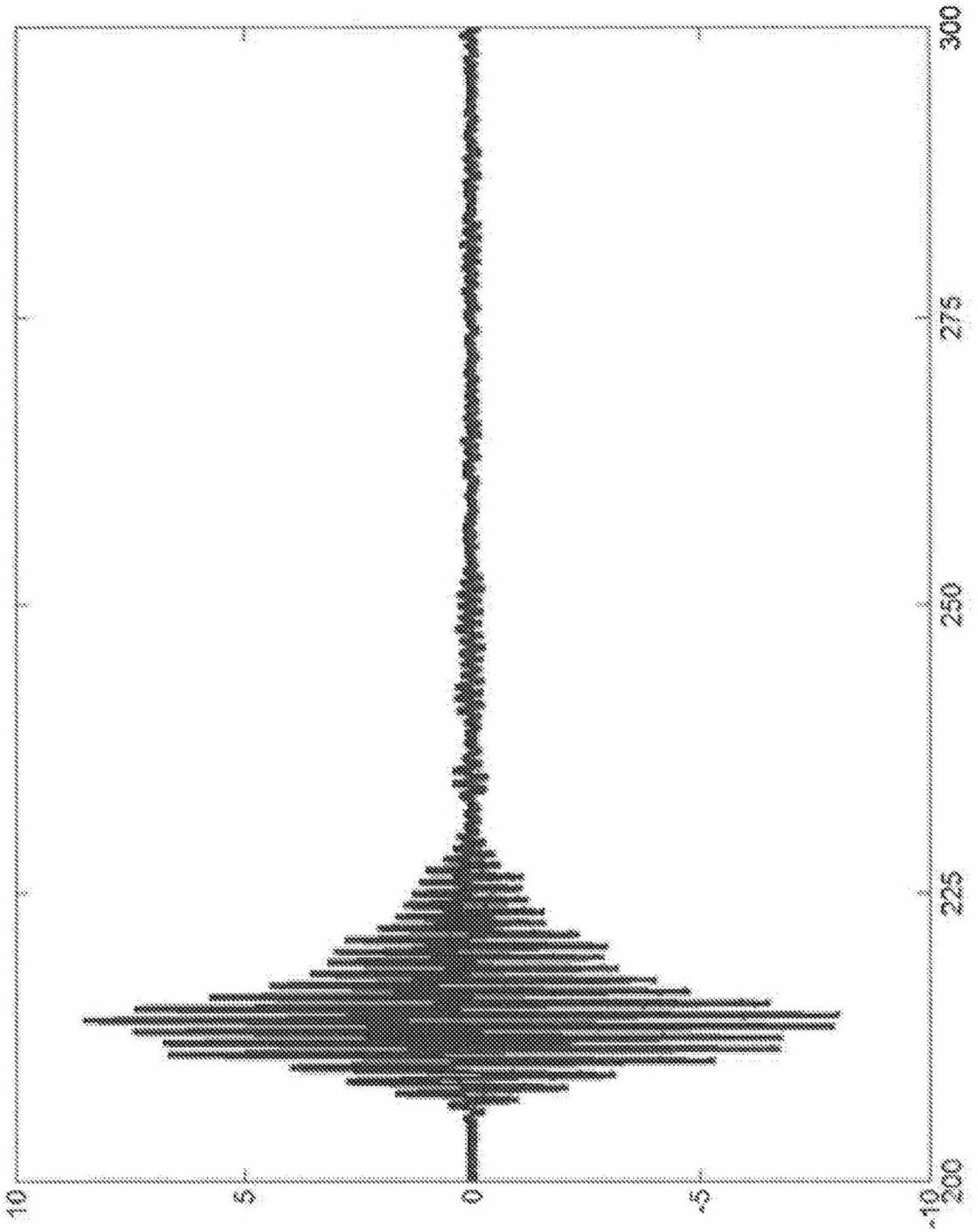
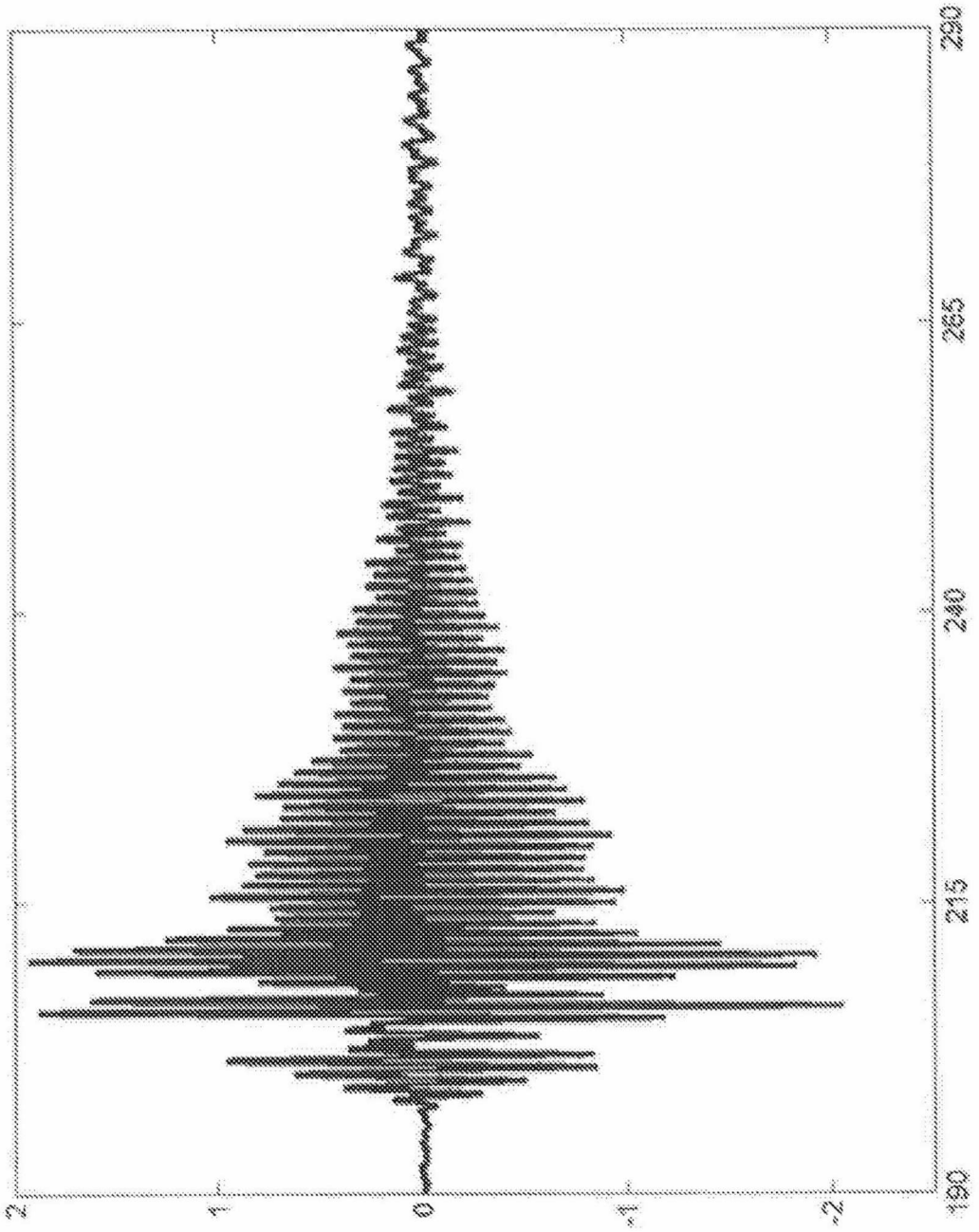


Fig. 59

Fig. 60



REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

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

- WO 2004102499 A
- WO 2013164805 A1
- WO 2014016159 A1