

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 757 558**

51 Int. Cl.:

G01F 1/66 (2006.01)

G01F 5/00 (2006.01)

G01M 3/28 (2006.01)

F17D 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.05.2016 PCT/US2016/032401**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.11.2016 WO16187020**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.05.2016 E 16797015 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.08.2019 EP 3234517**

54 Título: **Método y sistema para medición de tasa de flujo de fluido**

30 Prioridad:

15.05.2015 US 201562162568 P
16.06.2015 US 201514741124

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
29.04.2020

73 Titular/es:

RELIANCE WORLDWIDE CORPORATION
(100.0%)
2727 Paces Ferry Road SE, Building Two,
Suite 1800
Atlanta, GA 30339, US

72 Inventor/es:

GESTNER, BRIAN

74 Agente/Representante:

RIZZO, Sergio

ES 2 757 558 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y sistema para medición de tasa de flujo de fluido

SOLICITUD RELACIONADA

5 [0001] La presente solicitud reivindica prioridad de la solicitud de patente estadounidense n.º 14/741,124, titulada «METHOD AND SYSTEM FOR FLUID FLOW RATE MEASUREMENT» y presentada el 19 de junio de 2015, que reivindica prioridad de la solicitud provisional estadounidense n.º 62/162,568, titulada «METHOD AND SYSTEM FOR FLUID FLOW RATE MEASUREMENT» y presentada el 15 de mayo de 2015.

ANTECEDENTES

10 [0002] La monitorización de la tasa de flujo de fluido en un sistema de distribución de fluido puede permitir la eficacia de la bomba (como en los sistemas que emplean bombas), la detección de fugas o la monitorización remota de sistemas de distribución de fluidos. En los sistemas de distribución de agua, la monitorización de la tasa de flujo del agua puede ayudar a la monitorización del uso del agua y la detección de fugas de agua. Cuando se detectan fugas de agua en una etapa temprana, se pueden evitar daños considerables en los edificios. En un sistema de distribución de gas natural, una detección de fugas fiable puede ayudar a evitar explosiones y/o incendios peligrosos. La monitorización de la tasa
15 de flujo de fluido en los sistemas de distribución de fluido en presencia tanto de una fase líquida como de una fase gaseosa se conoce en la técnica, por ejemplo en US 2012/0055239 A1.

SUMARIO

[0003] Las características de la invención se exponen en las reivindicaciones adjuntas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

20 [0004]

La FIG. 1 muestra un diagrama que ilustra un sistema medidor de flujo montado sobre una tubería.

La FIG. 2 es un diagrama de flujo que ilustra un método para la estimación de la tasa de flujo de fluido o velocidad de flujo de fluido.

25 La FIG. 3 es un diagrama que ilustra diferentes implementaciones de copias o versiones de una señal (TX) de transmisión para la transmisión dentro de un periodo de tiempo determinado.

Las FIG. 4A-4C muestran resultados de simulación que ilustran el comportamiento de los tiempos de propagación diferenciales entre señales TX aguas abajo y aguas arriba en un fluido de flujo cero con retardos de fluctuación y sin ellos.

30 La FIG. 5 es un diagrama que ilustra un proceso de intercalación de muestras de múltiples señales RX recibidas para generar una respectiva señal intercalada de mayor resolución.

La FIG. 6 es un diagrama que ilustra un proceso de sobremuestreo de una señal digital asociada a una o más señales RX muestreadas con ADC para generar una respectiva señal RX sobremuestreada de mayor resolución.

La FIG. 7 muestra resultados experimentales de tiempos de propagación diferenciales medidos utilizando señales RX sobremuestreadas.

35 La FIG. 8A muestra un diagrama de bloques que ilustra un proceso 800 de estimación de un desplazamiento de tiempo entre una forma de onda de referencia y una señal RX de resolución fina en función de señal(es) de correlación cruzada parcial(es).

La FIG. 8B muestra una ilustración de la primera y la segunda señal de correlación cruzada.

40 La FIG. 8C muestra un gráfico de correlación cruzada y un diagrama de estado de máquina que ilustra un proceso para determinar un valor máximo de correlación cruzada asociado a un respectivo intervalo de tiempo.

La FIG. 8D es un diagrama que ilustra una búsqueda ternaria para localizar un valor de característica (como un máximo local o un mínimo local) dentro de un intervalo de tiempo.

La FIG. 9 es un diagrama de bloques que ilustra otro método para estimar la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido) en función de las señales ultrasónicas registradas.

45 DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0005] Los sistemas y dispositivos descritos en la exposición actual permiten una estimación precisa y económica de la tasa de flujo (o velocidad de flujo) de un fluido que fluye a través de un lumen, como una tubería. En particular, un

medidor de flujo de fluido ultrasónico puede incluir transductores ultrasónicos capaces de transmitir/recibir señales ultrasónicas para propagarse a través del flujo de fluido en el lumen. El medidor de flujo ultrasónico puede estimar la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido) en función de las características de propagación medidas o estimadas de la señal ultrasónica dentro del fluido. La velocidad de propagación de la señal ultrasónica (o tiempo de propagación) puede variar dependiendo del tipo de fluido, dirección del flujo de fluido y velocidad con respecto a la dirección de propagación de la señal, temperatura del fluido u otros parámetros de fluido que pueden afectar a la densidad del fluido o a la compresibilidad del fluido.

[0006] Una señal ultrasónica que se propaga en la misma dirección que un flujo de fluido (es decir, aguas abajo) se propaga más rápido que otra señal ultrasónica que se propaga en una dirección opuesta al flujo de fluido (es decir, aguas arriba) o más rápido que una señal ultrasónica que se propaga en un fluido que no está en movimiento. La velocidad del flujo de fluido (o la tasa de flujo de fluido) se puede estimar en función de la(s) diferencia(s) de tiempo de propagación de la señal ultrasónica (o diferencia de velocidad de propagación de la señal ultrasónica) entre señales que se propagan de forma diferente con respecto al flujo de fluido. Por ejemplo, la diferencia de velocidad de propagación de la señal ultrasónica en agua entre una señal que se propaga aguas arriba y una señal que se propaga aguas abajo es linealmente proporcional a la tasa de flujo del agua al menos para un intervalo práctico de tasas de flujo de agua.

[0007] La velocidad de flujo de fluido (o tasa de flujo de fluido) puede estimarse en función de retardos temporales relativos asociados a señales que se propagan de forma diferente (p. ej., señal aguas arriba y señal aguas abajo) con respecto al flujo de fluido en el lumen. Estos retardos relativos pueden estar, en algunos casos, en el intervalo de nanosegundos (ns). Para medir (o estimar) de forma precisa los retardos relativos entre las señales ultrasónicas, un medidor de flujo puede emplear múltiples convertidores analógico-digital (ADC), con sus respectivos relojes de ADC que funcionan con retardos relativos entre sí. El medidor de flujo puede intercalar muestras proporcionadas por ADC independientes para lograr una velocidad de muestreo efectiva para señales ultrasónicas medidas lo suficientemente altas para permitir la medición de retardos relativamente pequeños (como en el intervalo de nanosegundos). La utilización de múltiples ADC aumenta el coste del medidor de flujo y plantea desafíos técnicos como la eficiencia energética y la resolución de desajustes en la compensación de voltaje entre diferentes ADC. Un medidor de flujo también puede emplear un único ADC de alta velocidad para mejorar la resolución de la señal. Sin embargo, los ADC de alta velocidad son más caros y consumen considerablemente más energía que los ADC con velocidades de muestreo inferiores. Además, el empleo de un ADC de alta velocidad puede no ser suficiente para alcanzar una determinada resolución de señal deseada.

[0008] La FIG. 1 muestra un diagrama que ilustra un sistema medidor de flujo 100 montado sobre una tubería 10. El sistema de medidor de tasa de flujo 100 incluye dos transductores ultrasónicos 110a y 110b (a los que también se hace referencia individual o colectivamente como transductor(es) 110), dos guías de onda 120a y 120b (a las que también se hace referencia individual o colectivamente como guía(s) de onda 120), un circuito de control 150 acoplado a los transductores ultrasónicos 110 y un bloque transductor 130 para fijar los transductores ultrasónicos 110 a la tubería 10. El circuito de control 150 puede incluir un procesador 151 y un convertidor analógico-digital (ADC) 155.

[0009] Como se muestra en la FIG. 1, los transductores ultrasónicos 110 pueden montarse de forma no invasiva. En esta configuración, los transductores ultrasónicos 110 o las guías de onda 120 no interfieren en la trayectoria del flujo de fluido dentro de la tubería 10. Los transductores ultrasónicos 110 o las guías de onda 120 pueden montarse en la tubería 10 sin cortar ni ranurar la tubería 10. En una configuración invasiva, los transductores 110 pueden colocarse dentro de aberturas de la pared de la tubería 11. Las guías de onda 120 pueden ser opcionales. Como tal, los transductores 110 pueden montarse para estar directamente en contacto con la tubería 10, o muy cerca de ella, sin guías de onda 120.

[0010] Cada uno de los transductores ultrasónicos 110 puede transmitir y recibir señales ultrasónicas. Por ejemplo, el transductor ultrasónico 110a transmite la señal ultrasónica 101a, que se propaga a través de la guía de onda 120a hacia la tubería 10, se refleja desde la pared de la tubería 11 hacia la guía de onda 120b y se recibe en el transductor ultrasónico 110b. El transductor ultrasónico 110b transmite la señal ultrasónica 101b, que se propaga a través de la guía de onda 120b hacia la tubería 10, se refleja desde la pared de la tubería 11 hacia la guía de onda 120a y se recibe en el transductor ultrasónico 110a. En la tubería 10, el fluido fluye según la dirección 12. Como tal, la señal ultrasónica 101a se propaga aguas arriba (es decir, tiene un componente de movimiento a lo largo del eje de la tubería 10 con una dirección opuesta a la dirección 12 del flujo de fluido) dentro de la tubería 10 y la señal ultrasónica 101b se propaga aguas abajo (es decir, tiene un componente de movimiento a lo largo del eje de la tubería 10 con una dirección similar a la dirección 12 del flujo de fluido). Dada la dirección de propagación de las señales ultrasónicas 101a y 101b con respecto a la dirección del flujo de fluido 12, los tiempos de propagación respectivos se ven afectados de forma diferente por el flujo de fluido. Por ejemplo, se espera que el tiempo de propagación de la señal ultrasónica aguas abajo 101b sea más corto que el de la señal ultrasónica aguas arriba 101a. Las señales ultrasónicas que se propagan a través del fluido también se denominan en el presente documento señal(es) ultrasónica(s) 101.

[0011] En algunas implementaciones, los transductores ultrasónicos 110 pueden transmitir señales en una dirección (p. ej., aguas abajo o aguas arriba). El procesador 151 puede comparar el tiempo de propagación de señal de una señal ultrasónica aguas abajo o aguas arriba con el tiempo de propagación asociado a una señal que se propaga en un fluido que no está en movimiento para determinar el efecto del flujo de fluido en la propagación de la señal a través del fluido.

Además, aunque la FIG. 1 muestra una configuración ilustrativa de montaje de los transductores 110 en la tubería 10, la presente exposición contempla otras configuraciones. Por ejemplo, los transductores 110 pueden montarse uno sobre otro en la tubería 10, en un ángulo con respecto al eje longitudinal de la tubería de manera que las señales ultrasónicas 101 puedan propagarse entre los transductores 110 sin necesariamente rebotar en la pared de la tubería 11 (p. ej., propagándose en línea recta entre los transductores 101).

[0012] En algunas implementaciones, el sistema medidor de flujo 100 puede incluir más de dos transductores ultrasónicos 110. Cada transductor ultrasónico 110 del sistema medidor de flujo 100 puede actuar como un transmisor y un receptor. Algunos transductores ultrasónicos 110 en el sistema medidor de flujo 100 pueden configurarse (o diseñarse) para actuar como transmisores, mientras que otros pueden configurarse (o diseñarse) para actuar como receptores. Aunque el sistema 100 emplea los transductores ultrasónicos 110 para transmitir o recibir señales, se pueden emplear otros tipos de transmisores/receptores de señal como transmisores/receptores acústicos o electromagnéticos.

[0013] El ADC 155 puede configurarse para muestrear señales ultrasónicas (RX) de recepción recibidas en los transductores ultrasónicos 110. El sistema medidor de flujo 100 incluye un único convertidor ADC 155. La velocidad de muestreo del ADC 155 puede ser menor que una velocidad de muestreo asociada a una resolución de señal adecuada (o velocidad de muestreo deseada) para lograr una estimación precisa de la tasa de flujo de fluido, velocidad de flujo de fluido, o retardos temporales relativos asociados a señales ultrasónicas (RX) recibidas. Por ejemplo, el periodo de muestreo del ADC 155 puede encontrarse en el intervalo de microsegundos (μs), mientras que una resolución deseada de retardos relativos entre señales ultrasónicas 101 que se propagan por el fluido puede estar en el intervalo de nanosegundos (ns). En particular, una estimación precisa de la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido) puede implicar la detección de retardos (p. ej., entre señales aguas arriba y aguas abajo) en el intervalo de nanosegundos.

[0014] El ADC 155 puede acoplarse al procesador 151 o a una memoria asociada al circuito de control 150. Por ejemplo, el ADC 155 puede proporcionar muestras de señales directamente al procesador 151 o almacenar las muestras en una memoria a la que pueda acceder el procesador 151. El circuito de control 150 puede incluir además un convertidor digital-analógico (DAC) configurado para convertir muestras de forma de onda en señales analógicas. Por ejemplo, el DAC puede convertir muestras de una señal de excitación digital en una señal de excitación analógica respectiva que se proporciona como entrada al transductor ultrasónico o a los transductores ultrasónicos 110. El procesador 151 o una memoria asociada al circuito de control 150 puede almacenar las muestras de la señal de excitación digital. El ADC 151 puede funcionar como un ADC y un DAC. La señal de excitación digital puede incluir un ruido pseudoaleatorio, un tren de pulsos con una frecuencia dada, un tono puro a una frecuencia dada, una señal de línea o chirrido logarítmico o un tren de pulsos de frecuencia modulada (por ejemplo, con frecuencia creciente o decreciente). En respuesta a la señal de excitación analógica de entrada, el transductor 110 puede generar una señal pasabanda que se transmite a la tubería 10.

[0015] El procesador 151 puede configurarse para controlar el funcionamiento y la temporización de los transductores ultrasónicos 110 (p. ej., iniciar la transmisión/recepción de señales ultrasónicas 101), controlar el funcionamiento del ADC 155 (p. ej., iniciar el muestreo de señales por parte del ADC 155), controlar el funcionamiento de uno o más componentes del circuito de control 150, iniciar y gestionar la comunicación con otros dispositivos, ejecutar procesos para estimar retardos relativos entre distintas señales o estimar la tasa de flujo de fluido, gestionar el consumo de energía del sistema medidor de flujo 100 o una combinación de estos. El procesador 151 puede incluir uno o más de entre un microprocesador, un microcontrolador, un procesador de señales digitales (DSP) y un circuito integrado de aplicación específica (ASIC). El circuito de control 150 puede incluir también circuito(s) de comunicación o componente(s) para comunicarse con otros dispositivos, uno o más amplificadores de señal u otros circuitos analógicos o digitales.

[0016] La FIG. 2 es un diagrama de flujo que ilustra un método 200 para la estimación de la tasa de flujo de fluido o velocidad de flujo de fluido. Con referencia a las FIG. 1 y 2, el método 200 puede incluir la transmisión por parte de los transductores ultrasónicos 110 de una o más señales TX (etapa 210) y la recepción de una o más señales RX respectivas (etapa 220). El método 200 puede incluir el muestreo de una o más señales RX por parte del ADC 155 según una primera velocidad de muestreo (etapa 230), y la generación por parte del procesador 151 de al menos una señal RX de alta resolución en función de muestras de la una o más señales RX proporcionadas por el ADC 155 (etapa 240). La al menos una señal RX de alta resolución corresponde a una segunda velocidad de muestreo superior a la primera velocidad de muestreo. El método 200 puede incluir también el cálculo por parte del procesador 151, para cada una de la al menos una señal RX de alta resolución, de una señal de correlación cruzada respectiva entre la señal RX de alta resolución y una forma de onda (etapa 250). El método 200 también puede incluir la estimación por parte del procesador 151 de la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido) en función de la(s) señal(es) de correlación cruzada calculadas (etapa 256).

[0017] El método 200 puede incluir la transmisión por parte de los transductores 110 de una o más señales TX (etapa 210) y la recepción de una o más señales RX respectivas (etapa 220). Los transductores ultrasónicos 110 pueden transmitir (como en respuesta a una o varias instrucciones o señales de excitación del procesador 151) una o más señales aguas abajo, una o más señales aguas arriba, o una combinación de estas. Los transductores ultrasónicos 110

transmiten una pluralidad de copias o versiones de una señal TX y reciben una pluralidad de señales RX respectivas en un periodo de tiempo dado. La pluralidad de copias o versiones de la señal TX puede incluir señales transmitidas aguas arriba, señales transmitidas aguas abajo, o una combinación de estas. El periodo de tiempo dado puede estar en el intervalo de cientos de microsegundos (μs), milisegundos (ms) o cualquier otro periodo de tiempo durante el que no se espere una variación de las características del canal. Los medios (p. ej., la tubería 10, el fluido, las guías de onda o una combinación de estos) a través de los que se propagan las señales ultrasónicas desde un transductor hasta otro pueden verse como un canal de comunicación cuyas características pueden variar, por ejemplo, debido a una variación de temperatura de los medios. La redundancia asociada a la pluralidad de señales RX recibidas correspondientes a la pluralidad de copias o versiones transmitidas de la señal TX permite una reducción del ruido, por ejemplo, utilizando métodos de promedio al estimar los retardos de señal relativos (o diferencias entre tiempos de propagación de señales). Los transductores ultrasónicos 110 pueden transmitir una pluralidad de copias de la señal TX que están sincronizadas con respecto a la señal de reloj de ADC. Según la invención, los transductores ultrasónicos 110 transmiten una pluralidad de versiones de la señal TX con distintos retardos fraccionales (o diferenciales) (es decir, cantidad de retardo modulo el periodo T de muestreo del ADC) con respecto a la señal de reloj de ADC. El procesador 151 proporciona versiones retardadas (como con distintos retardos temporales) de una señal de excitación como entrada al transductor 110 para generar versiones retardadas de la misma señal TX.

[0018] La FIG. 3 es un diagrama que ilustra diferentes implementaciones de copias o versiones de una señal (TX) de transmisión para la transmisión dentro de un periodo de tiempo determinado. Según un primer supuesto, el transductor 110 puede transmitir de forma consecutiva tres (o cualquier otro número de) copias 301a, 301b y 301c de la señal TX que tienen el mismo retardo fraccional (o diferencial) (p. ej., retardo fraccional cero) con respecto a los flancos ascendentes de la señal de reloj de ADC 310. Como tal, el retardo de transmisión relativo entre dos copias cualquiera de las tres copias 301a, 301b y 301c de la señal TX puede ser un múltiplo del periodo T (como $k \times T$ donde k es un número entero) de la señal de reloj de ADC 310.

[0019] Según un segundo supuesto, el transductor 110 puede transmitir tres (o cualquier otro número de) versiones 302a, 302b y 302c de la señal TX con distintos retardos deterministas fraccionales (o diferenciales) con respecto a los flancos ascendentes de la señal de reloj de ADC 310. Por ejemplo, los retardos fraccionales pueden ser $0, \frac{T}{3}$ y $\frac{2T}{3}$ dando lugar a retardos lineales fraccionales (o diferenciales). Si N (N es un número entero) versiones de la señal TX se transmiten en el periodo de tiempo dado, los retardos fraccionales correspondientes con respecto a los flancos

ascendentes de la señal de reloj de ADC 310 pueden ser iguales a $0, \frac{T}{N}, \frac{2T}{N}, \dots, \frac{(N-1)T}{N}$. Como se analizará más adelante, el procesador 151 puede emplear el conocimiento de los retardos deterministas fraccionales (o diferenciales) para las versiones transmitidas (p. ej., versiones 302a, 302b y 302c) de la señal TX y las señales RX recibidas correspondientes para generar la señal RX de alta resolución. Las versiones transmitidas 302a, 302b y 302c de la señal TX pueden propagarse a través del fluido (entre los transductores 110) en intervalos de tiempo no solapados. Por ejemplo, los tiempos de transmisión asociados a las versiones transmitidas (p. ej., versiones 302a, 302b y 302c) de la

señal TX pueden ser igual a $t, t + \frac{T}{N} + kT, t + \frac{2T}{N} + 2kT, \dots, t + \frac{(N-1)T}{N} + (n-1)kT$. Aunque las versiones transmitidas de la señal TX no se solapan en el tiempo, los retardos fraccionales (o diferenciales) $0, \frac{T}{N}, \frac{2T}{N}, \dots, \frac{(N-1)T}{N}$ están separados de forma uniforme entre sí dentro del periodo T de la señal de reloj de ADC (o periodo de muestreo de ADC). En algunas implementaciones, los retardos fraccionales (o diferenciales) pueden estar separados de forma no uniforme dentro del periodo T.

[0020] Según un tercer supuesto, el transductor o los transductores 110 puede(n) transmitir tres (o cualquier otro número de) versiones 303a, 303b y 303c de la señal TX con distintos retardos aleatorios respectivos (p. ej., retardos de fluctuación) α_1, α_2 y α_3 con respecto a los flancos ascendentes de la señal de reloj de ADC 310. El procesador 151 puede generar los valores para α_1, α_2 y α_3 como ejemplos de una variable aleatoria (como una variable aleatoria uniforme, una variable aleatoria gaussiana, una variable aleatoria de Ki cuadrado u otra variable aleatoria). En general, el procesador 151 puede generar N retardos de fluctuación $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ como ejemplos de una variable aleatoria para N versiones respectivas de la señal TX que se han de transmitir dentro del periodo de tiempo dado. En algunas implementaciones, la aplicación de retardos de fluctuación a los tiempos de transmisión de las versiones de la señal TX ayuda a mitigar errores, como errores debidos a la computación de precisión finita, en tiempos de propagación medidos (o estimados) respectivos.

[0021] Las FIG. 4A-4C muestran resultados de simulación que ilustran el comportamiento de los tiempos de propagación diferenciales entre señales TX aguas abajo y aguas arriba en un fluido de flujo cero con retardos de fluctuación y sin ellos. El eje y en las FIG. 4A-4C representa el tiempo de propagación diferencial entre las señales aguas abajo y aguas arriba y el eje x representa el tiempo de propagación medio para las señales aguas abajo y aguas arriba. El tiempo de propagación diferencial es la diferencia de tiempo medida entre el tiempo de propagación aguas abajo y el tiempo de propagación aguas arriba para un respectivo par de señales transmitidas, incluidas una señal aguas abajo y una señal aguas arriba.

[0022] La FIG. 4A muestra resultados de simulación para señales aguas abajo y aguas arriba sin retardos de fluctuación aplicados. La FIG. 4B muestra resultados de simulación para señales aguas abajo y aguas arriba con retardos de fluctuación aplicados entre 0 y 25 ns. La FIG. 4C muestra resultados de simulación para señales aguas abajo y aguas arriba con retardos de fluctuación aplicados entre 0 y 250 ns. Para todos los resultados de simulación de las FIG. 4A-4C, los tiempos de propagación aguas abajo y aguas arriba se asocian a un fluido que no se encuentra en movimiento (es decir, con una tasa de flujo igual a 0 galones por minuto (GPM)). En una condición de flujo cero (es decir, fluido inmóvil), se esperaría que los tiempos de propagación diferenciales registrados fueran iguales a 0. Sin embargo, debido al ruido de la señal y a los errores computacionales, los tiempos de propagación diferenciales registrados pueden no ser exactamente cero. Comparando los resultados de las FIG. 4A-4C, se puede observar que cuando no se aplican retardos de fluctuación en los tiempos de transmisión (como se muestra en la FIG. 4A), los tiempos de propagación diferenciales registrados muestran desviaciones de cero relativamente mayores (p. ej., en comparación con los resultados de las FIG. 4B y 4C). Asimismo, a medida que aumenta el tiempo de propagación de señal medio (es decir, aumenta a lo largo del eje x), los tiempos de propagación diferenciales registrados muestran un comportamiento de oscilación acumulativo alrededor de cero. Sin embargo, cuando se aplican retardos de fluctuación (como se muestra en las FIG. 4B y 4C), los tiempos de propagación diferenciales registrados se aproximan a cero, lo que implica errores respectivos más pequeños. Además, aunque los resultados mostrados en la FIG. 4B todavía muestran errores relativamente grandes y un comportamiento de oscilación acumulativo alrededor de cero a medida que aumenta el tiempo de propagación de señal medio, los resultados mostrados en la FIG. 4C ilustran un error aún más pequeño sin comportamiento de oscilación. Como se ilustra mediante los resultados de simulación mostrados en las FIG. 4A-4C, los retardos de fluctuación aplicados a los tiempos de transmisión de las versiones transmitidas de la señal TX mitigan los errores en los tiempos de propagación diferenciales medidos entre las señales aguas abajo y aguas arriba y, por tanto, permiten una estimación más precisa de los tiempos de propagación y los tiempos de propagación diferenciales de las versiones transmitidas de la señal TX.

[0023] Haciendo referencia de nuevo a la FIG. 3, según un cuarto supuesto, el transductor o los transductores 110 pueden transmitir tres (o cualquier otro número de) versiones 304a, 304b y 304c de la señal TX, definiéndose los respectivos retardos temporales (con respecto a flancos ascendentes de la señal de reloj de ADC 310) como acumulaciones de retardos deterministas y de fluctuación. Por ejemplo, los retardos fraccionales asociados a las versiones 304a, 304b y 304c de la señal TX (con respecto a los flancos ascendentes de la señal de reloj de ADC 310) pueden ser iguales a α_1 , $\alpha_2 + \frac{T}{N}$ y $\alpha_3 + \frac{2T}{N}$, respectivamente. Para N versiones transmitidas de la señal TX, los retardos fraccionales respectivos pueden ser igual a α_1 , $\alpha_2 + \frac{T}{N}$, $\alpha_3 + \frac{2T}{N}$, ..., $\alpha_N + \frac{(N-1)T}{N}$. Como tal, cada retardo fraccional asociado a una respectiva versión transmitida de la señal TX es una agregación de un valor de retardo determinista (p. ej., $\frac{nT}{N}$, donde n es un número entero entre 0 y N - 1) y un valor de retardo de fluctuación (p. ej., α_i donde i es un índice entre 1 y N).

[0024] En algunas implementaciones, el procesador 151 puede aplicar los retardos descritos anteriormente a una señal de excitación proporcionada como entrada al transductor o los transductores 110 y, en respuesta, el transductor o los transductores 110 pueden generar señales TX correspondientes con los mismos retardos aplicados a la señal de excitación correspondiente. Aunque los supuestos mostrados en la FIG. 3 se describen con respecto a retardos temporales, se pueden implementar los mismos supuestos aplicando desplazamientos de fase en el dominio de la frecuencia. Es decir, en lugar de aplicar retardos a las señales de excitación, el procesador 151 puede añadir desplazamientos de fase a las versiones de la señal de excitación en el dominio de la frecuencia. Los desplazamientos de fase pueden ser desplazamientos de fase deterministas (es decir, que corresponden al segundo supuesto), desplazamientos de fase de fluctuación (que corresponden al tercer supuesto) o una combinación de estos (que corresponden al cuarto supuesto). El procesador 151 puede utilizar la transformación de Fourier rápida (TFR, o FFT por sus siglas en inglés) para transformar la señal de excitación al dominio de la frecuencia y la transformación de Fourier rápida inversa (TFRI, o IFFT por sus siglas en inglés) para transformar las versiones con desplazamiento de fase de la señal de excitación de nuevo al dominio del tiempo. En algunas implementaciones, el circuito de control 150 puede almacenar una copia de la señal de excitación y/o copias de las respectivas versiones con desplazamiento de fase en el dominio de la frecuencia para evitar cálculos de FFT y/o IFFT repetitivos. Aunque los retardos fraccionales descritos anteriormente con respecto a la FIG. 3 se definen con respecto a los flancos ascendentes de la señal de reloj de ADC 310, estos retardos fraccionales pueden definirse con respecto a flancos descendentes u otras referencias asociadas a la señal de reloj de ADC 310.

[0025] El método 200 puede incluir el muestreo por parte de ADC 155 de cada una de las señales RX recibidas a una primera velocidad de muestreo R_1 (etapa 230). Por ejemplo, la velocidad de muestreo R_1 puede asociarse a un periodo de muestreo igual al periodo T del reloj de ADC o un múltiplo de este. El ADC 155 puede acoplarse a los transductores ultrasónicos 110 y configurarse para recibir las señales RX directamente de los transductores 110. En algunas implementaciones, un amplificador puede amplificar las señales RX recibidas antes del proceso de muestreo. Tras el muestreo de las señales RX recibidas, el ADC 155 puede proporcionar las muestras respectivas al procesador 151 o a una memoria accesible por el procesador 151. En algunas implementaciones, la primera velocidad de muestreo R_1 puede ser inferior a una resolución de señal fina (o una segunda velocidad de muestreo deseada R_d). Por ejemplo, la

primera velocidad de muestreo puede encontrarse en el intervalo de cientos de megahercios (MHz), mientras que la resolución de señal fina deseada puede asociarse a una segunda velocidad de muestreo en el intervalo de gigahercios (GHz).

5 **[0026]** Volviendo a la FIG. 2, el método 200 puede incluir la generación por parte del procesador 151, en función de las muestras de señales RX recibidas, de al menos una señal RX de resolución fina respectiva asociada a una segunda velocidad de muestreo R_d superior a la primera velocidad de muestreo R_i . Dadas la primera velocidad de muestreo y la velocidad de muestreo deseada R_i y R_d , el procesador 151 puede determinar el factor de resolución rf (como $rf = \left\lceil \frac{R_d}{R_i} \right\rceil$ o $\left\lceil \frac{R_d}{R_i} \right\rceil$). El procesador 151 puede generar entonces la(s) señal(es) RX de resolución fina en función del factor de resolución rf y las muestras de la(s) señal(es) RX recibida(s).

10 **[0027]** La FIG. 5 es un diagrama que ilustra un proceso de muestras intercaladas de múltiples señales RX recibidas para generar una respectiva señal intercalada de mayor resolución. Por ejemplo, los transductores ultrasónicos 110 pueden transmitir múltiples copias de la señal TX con retardos fraccionales graduales lineales (o no lineales) con respecto a la señal de reloj de ADC (por ejemplo, como se ha analizado con respecto al segundo supuesto de la FIG. 3). En el ejemplo que se muestra en la figura 5, un primer transductor 110 puede transmitir dos versiones de la señal TX

15 con retardos fraccionales iguales a 0 y $\frac{T}{2}$ respectivamente. Un segundo transductor 110 puede recibir las señales RX respectivas y un amplificador asociado al circuito de control 150 puede amplificar las señales RX recibidas. El ADC 155 puede entonces muestrear las señales RX amplificadas a una primera velocidad de muestreo (p. ej., igual a 4 MHz). Las muestras de la primera señal RX 501a y las muestras de la segunda señal RX 501b están fuera de sinc. por $\frac{T}{2}$. El procesador 151 puede intercalar las muestras de la primera y la segunda señal RX 501a y 501b para generar una respectiva señal RX de resolución intercalada de mayor resolución 502 con una respectiva velocidad de muestreo efectiva igual a (p. ej., 8 MHz) dos veces la primera velocidad de muestreo del ADC 155. Aunque el ejemplo ilustrado en la FIG. 5 muestra la intercalación de muestras de dos señales RX distintas (como señales RX 501a y 501b), se puede emplear cualquier número de señales RX para generar la señal intercalada 502.

25 **[0028]** En algunas implementaciones, el procesador 151 puede hacer que el primer transductor 110 transmita un número de versiones de la señal TX igual al factor de resolución rf con los respectivos retardos fraccionales graduales (o desplazamientos de fase graduales correspondientes). A continuación, el procesador 151 puede intercalar las muestras de las respectivas señales RX recibidas rf para generar una señal RX de resolución fina con una segunda velocidad de muestreo $R_2 = rf.R_1$. Los retardos graduales pueden ser retardos graduales deterministas (como se ha analizado con respecto al segundo supuesto de la FIG. 3) o una combinación de retardos graduales deterministas y retardos de fluctuación (como se ha analizado con respecto al cuarto supuesto de la FIG. 3).

30 **[0029]** La FIG. 6 es un diagrama que ilustra un proceso de sobremuestreo de una señal digital asociada a una o más señales RX muestreadas por el ADC para generar una respectiva señal RX sobremuestreada de mayor resolución. La señal digital de entrada 601 que se ha de sobremuestrear puede ser una única señal RX muestreada por el ADC, una señal intercalada generada por muestras intercaladas de múltiples señales RX recibidas (por ejemplo, como se ha analizado anteriormente con respecto a la FIG. 5). El procesador 151 puede insertar ceros en una señal digital de entrada 601 (bloque 610). Por ejemplo, si la señal digital de entrada 601 es una señal RX muestreada, para cada muestra de la señal RX muestreada, el procesador 151 puede insertar $rf-1$ ceros (por ejemplo, precediendo o sucediendo la muestra original). Después, el procesador 151 puede interpolar las muestras de la señal a la que se le han insertado ceros utilizando un filtro de paso bajo o una función de transferencia de este (bloque 620) para generar la señal de resolución fina 602. En algunas implementaciones, la función de transferencia del filtro de paso bajo 605 puede ser una función sinc truncada. Por ejemplo, la función de transferencia 605 puede ser una función sinc truncada que incluye un único lóbulo (es decir, el lóbulo principal de la función sinc), una función sinc truncada que incluye tres lóbulos u otro truncamiento de la función sinc. En algunas implementaciones, la incorporación de ceros en el bloque 610 y la interpolación en el bloque 620 pueden implementarse como una única operación de filtrado. En algunas implementaciones, se pueden emplear otras funciones (como una función triangular o una función gaussiana truncada) para la interpolación. En algunas implementaciones, el procesador 151 puede insertar, para cada muestra de señal de la señal digital de entrada 601, $rf-1$ copias de esa muestra en lugar de emplear la incorporación de ceros.

45 **[0030]** La FIG. 7 muestra resultados experimentales de tiempos de propagación diferenciales medidos utilizando señales RX sobremuestreadas. Los resultados experimentales se generan en función de una tubería de CPVC (policloruro de vinilo clorado) de $\frac{3}{4}$ pulgadas (1,90 cm), transductores ultrasónicos de 1 MHz y ADC de 4 MHz. Los resultados experimentales mostrados en los gráficos (a)-(c) incluyen 200 diferencias en los tiempos de propagación (entre señales aguas abajo y aguas arriba) medidos para diversas tasas de flujo. Las líneas continuas representan la diferencia media en tiempo de propagación (calculada promediando las diferencias medidas en los valores de tiempo de propagación a las tasas de flujo de fluido respectivas) como una función de la tasa de flujo de fluido. La diferencia en los valores del tiempo de propagación se mide mediante la correlación cruzada de las señales RX sobremuestreadas con una forma de onda de referencia con una velocidad de muestreo respectiva de 4 MHz.

[0031] Con respecto a los resultados experimentales mostrados en el gráfico (a), se incorporan ceros a las señales RX recibidas para lograr una velocidad de sobremuestreo de 256, pero no se aplica interpolación al generar las respectivas señales RX sobremuestreadas (o de resolución fina). El correspondiente error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés) para la diferencia media en los tiempos de propagación mostrados en el gráfico (a) es 0,006. Con respecto a los resultados experimentales mostrados en el gráfico (b), se incorporan ceros a las señales RX y, a continuación, se aplica una interpolación en función de un filtro de retenedor de orden cero a la señal a la que se le han incorporado ceros para lograr una velocidad de sobremuestreo de 256. El MSE correspondiente es 0,0009975. Con respecto a los resultados experimentales mostrados en el conjunto gráfico (c), se incorporan ceros a las señales RX recibidas y, a continuación, se aplica una interpolación en función de una función sinc truncada con un solo lóbulo a la señal a la que se le han incorporado ceros para lograr una velocidad de sobremuestreo de 256. El MSE correspondiente es 0,0001623. Los MSE calculados ilustran que se pueden conseguir estimaciones más precisas de los tiempos de propagación diferenciales al utilizar la función sinc truncada (p. ej., con 512 muestras) para interpolación en comparación con el caso en el que no se aplica interpolación (gráfico (a)) o se aplica una interpolación que utiliza un filtro de retenedor de orden cero (gráfico (b)). Es decir, el empleo de la función sinc truncada (p. ej., truncada para incluir un solo lóbulo) para la interpolación permite una mejora considerable en términos de precisión de los tiempos de propagación de señales estimados (o medidos). Asimismo, el truncamiento de la función sinc (o cualquier otra función de transferencia de un filtro de paso bajo respectivo) permite una reducción de la complejidad computacional.

[0032] Volviendo de nuevo a las FIG. 2, 5 y 6, el procesador 151 puede generar la señal de resolución fina empleando tanto intercalación de señales (como se ha analizado con respecto a la FIG. 5) como sobremuestreo (como se ha analizado con respecto a la FIG. 6). La intercalación de señales permite aumentar de forma precisa la resolución de señal utilizando señales RX recibidas en un periodo de tiempo durante el que las características del canal no varían (o al menos no varían de forma considerable). Sin embargo, en algunos casos, este periodo de tiempo puede no ser suficiente para transmitir señales TX r_f que no se solapan en el tiempo (y en respuesta recibir señales RX r_f correspondientes). Por ejemplo, si el periodo de tiempo durante el que las características del canal no varían de forma considerable es de 5 ms y la duración de tiempo para transmitir cada señal es de 0,1 ms, el sistema medidor de flujo puede utilizar como máximo 50 señales RX para intercalar para lograr una señal intercalada con una velocidad de muestreo efectiva igual a 50 veces la velocidad de muestreo de las señales RX. Si el factor de resolución r_f es superior a 50 (como $r_f = 256$), el sistema medidor de flujo 100 puede aplicar además sobremuestreo (como se analiza con respecto a la FIG. 6) a una señal intercalada para generar una señal RX de resolución fina con la resolución deseada R_d . Además, en algunos casos, la velocidad de muestreo del ADC puede ser inferior a la velocidad de Nyquist. En estos casos, se puede emplear la intercalación de señales para evitar el solapamiento. La(s) señal(es) intercalada(s) puede(n) sobremuestrearse entonces para generar la señal de resolución fina con la resolución deseada R_d .

[0033] Volviendo de nuevo a la FIG. 2, el método 200 puede incluir el cálculo de una señal de correlación cruzada entre la señal RX resolución fina y una forma de onda de referencia (etapa 250) y la determinación de una diferencia en el tiempo de propagación entre la forma de onda de referencia y la señal RX resolución fina. La forma de onda de referencia puede ser una representación (p. ej., una versión muestreada) de una señal RX aguas arriba, una señal RX aguas abajo, una señal RX de flujo cero (es decir, una señal RX recibida cuando la tasa de flujo de fluido es cero), una señal TX o una forma de onda derivada de estas. Por ejemplo, si la señal RX de resolución fina se genera en función de una o más señales RX aguas abajo, la forma de onda de referencia puede ser una señal RX aguas arriba o una señal RX de flujo cero. Si la señal RX de resolución fina 502 o 602 se genera en función de una o más señales RX aguas arriba, la forma de onda de referencia puede asociarse a una señal RX aguas abajo, una señal RX de flujo cero o la señal TX respectiva. En algunos casos, el procesador 151 puede producir la forma de onda de referencia filtrando la señal TX (o la señal de excitación respectiva) utilizando un filtro configurado para modelar distorsiones de señales inducidas por los transductores 110, la tubería 10, el fluido, el amplificador (si lo hubiera), el ADC 155, las guías de onda 120 o una combinación de estos.

[0034] En algunas implementaciones, la forma de onda de referencia puede ser una onda sinusoidal o otra señal de banda estrecha. En estas implementaciones, el procesador 151 puede calcular una primera señal de correlación cruzada que representa una correlación cruzada entre una señal RX aguas arriba y la onda sinusoidal (o la señal de banda estrecha), y una segunda señal de correlación cruzada que representa una correlación cruzada entre una señal RX aguas abajo y la onda sinusoidal (o la señal de banda estrecha). Al utilizar la primera y la segunda señal de correlación cruzada, el procesador 151 puede determinar una diferencia en el tiempo de propagación de señal entre la señal aguas arriba y la señal aguas abajo. El procesador 151 puede determinar esta diferencia de tiempo de propagación de señal en función de un desplazamiento temporal entre la primera y la segunda señal de correlación cruzada. Por ejemplo, el procesador puede determinar el desplazamiento temporal como desplazamiento temporal entre dos máximos locales (o dos mínimos locales o dos correlaciones cero) asociadas a la primera y la segunda señal de correlación cruzada, respectivamente. En algunos ejemplos, la primera y la segunda señal de correlación cruzada pueden asociarse a una señal RX aguas arriba y una señal de flujo cero (o una señal de flujo cero y una señal aguas abajo).

[0035] En algunas implementaciones, el procesador 151 puede filtrar dos señales RX (como una señal RX aguas arriba y una señal RX aguas abajo, una señal de flujo cero y una señal aguas arriba, o una señal RX aguas abajo y una señal RX de flujo cero) utilizando un filtro de banda estrecha y calcular entonces una señal de correlación cruzada entre las señales filtradas. En estas implementaciones, una de las señales RX filtradas actúa como la forma de onda de

referencia. La aplicación de un filtrado de pasabanda o la utilización de una señal de banda estrecha (como una forma de onda sinusoidal) como forma de onda de referencia permite la estimación de la diferencia de tiempo de propagación de señal con respecto a los componentes estrechos de la(s) señal(es) RX. Este enfoque proporciona una mejor precisión, especialmente si la velocidad de señal ultrasónica en el fluido (o a través de la pared de la tubería 11) varía en términos de frecuencia. La utilización de componentes de banda estrecha de las señales RX recibidas permite mitigar cualquier error, en la estimación de la diferencia de tiempo de propagación de señal, debido a la variación de velocidad de señales como una función de la frecuencia de señal.

[0036] La forma de onda de referencia puede presentar una resolución respectiva correspondiente a la primera velocidad de muestreo, la segunda velocidad de muestreo o una velocidad de muestreo intermedia. Calcular una señal de correlación cruzada completa (p. ej., incluyendo todos los valores de correlación cruzada en función de las muestras de la señal de resolución fina y la forma de onda de referencia) es computacionalmente exigente, puesto que implica un gran número de multiplicaciones. Las FIG. 8A-D ilustran procesos para la estimación de desplazamientos temporales entre distintas señales en función de cálculos eficientes de valores de correlación cruzada.

[0037] La FIG. 8A muestra un diagrama de bloques que ilustra un proceso 800 de estimación de un desplazamiento temporal entre una forma de onda de referencia y una señal RX de resolución fina en función de señal(es) de correlación cruzada parcial(es). El procesador 151 puede configurarse para calcular una señal de correlación cruzada en función de una señal de entrada 801 generada en función de una o más señales RX y una primera forma de onda de referencia 805. La señal de entrada 801 puede ser una señal RX recibida (aguas abajo o aguas arriba), una versión sobremuestreada de una señal RX recibida, una versión intercalada de dos o más señales RX recibidas, una versión filtrada de banda estrecha de una señal RX u otra señal representativa de una o más señales RX. La señal de resolución fina 802 puede representar una versión de resolución fina de la señal de entrada 802, una versión de resolución fina de una o más señales RX o una versión de resolución fina de una o más señales RX filtradas de banda estrecha. La velocidad de muestreo efectiva de la señal de entrada 801 puede ser una velocidad que oscile entre R_1 y R_d .

[0038] La segunda forma de onda de referencia 807 puede ser una señal RX de flujo cero muestreada (o una versión filtrada de banda estrecha de esta), una señal RX aguas arriba muestreada (o una versión filtrada de banda estrecha de esta), una señal RX aguas abajo muestreada (o una versión filtrada de banda estrecha de esta), una versión sobremuestreada y/o una versión intercalada de una señal RX (o una versión filtrada de banda estrecha de esta), una onda sinusoidal, o una señal de banda estrecha, mientras que la primera forma de onda de referencia 805 puede ser una versión truncada, submuestreada o recortada de la segunda forma de onda de referencia 807. Por ejemplo, la primera forma de onda de referencia 805 puede producirse anulando (p. ej., forzando a ser cero) las muestras de la segunda forma de onda de referencia 807 con amplitudes respectivas que son más pequeñas que un valor umbral dado. Este valor umbral puede ser igual al 90 %, 95 % u otro porcentaje del valor de muestra máximo de la segunda forma de onda de referencia 807. En algunas implementaciones, la primera forma de onda de referencia 805 puede definirse como una parte de la segunda forma de onda de referencia 807 asociada a un intervalo de tiempo respectivo. Por ejemplo, las muestras de la primera forma de onda de referencia 805 pueden ser iguales a las muestras respectivas de la segunda forma de onda de referencia 807 dentro del intervalo de tiempo dado e iguales a cero fuera del intervalo de tiempo dado. El intervalo de tiempo puede seleccionarse (o definirse) para capturar las muestras de alta energía (como alrededor del valor máximo) de la segunda forma de onda de referencia 807. La primera y la segunda forma de onda de referencia 805 y 807 pueden generarse durante la calibración del sistema medidor de flujo 100. La primera y la segunda forma de onda de referencia 805 y 807 pueden generarse sobre la marcha en función de una o más señales RX recibidas. En algunos casos, la señal de resolución fina 802 puede representar una o más señales RX aguas abajo y la primera y la segunda forma de onda de referencia 805 y 807 pueden generarse en función de una o más señales RX aguas arriba (o viceversa). La utilización de una versión truncada, submuestreada o recortada de una señal RX recibida (o de una señal representativa de una o más señales RX) permite una reducción de la complejidad computacional al calcular la primera señal de correlación cruzada.

[0039] El procesador 151 puede determinar entonces una primera estimación de la diferencia de tiempo de propagación de señal asociada a dos señales RX distintas en función de la primera señal de correlación cruzada calculada (bloque 810). Por ejemplo, si la primera forma de onda de referencia 805 es una representación de una señal RX, el procesador 151 puede calcular la primera estimación de la diferencia de tiempo de propagación de señal como el desplazamiento temporal entre la primera forma de onda de referencia 805 y la señal de entrada 801 en función de la señal de correlación calculada utilizando la primera forma de onda de referencia 805 y la señal de entrada 801. Sin embargo, si la primera forma de onda de referencia 805 es una onda sinusoidal o una señal de banda estrecha, el procesador 151 puede calcular una señal de correlación cruzada utilizando una primera señal de entrada 801 (p. ej., que represente una señal RX aguas abajo) y la primera forma de onda de referencia 805, y otra señal de correlación cruzada utilizando una segunda señal de entrada 801 (p. ej., que represente una señal RX aguas arriba) y la primera forma de onda de referencia 805. El procesador puede determinar una primera estimación de la diferencia de tiempo de propagación de señal asociada a la primera y la segunda señal de entrada 801 como el desplazamiento temporal entre las señales de correlación cruzada calculadas. En algunas implementaciones, en lugar de calcular una estimación aproximada del desplazamiento temporal entre la señal de entrada 801 y la primera forma de onda de referencia de entrada 805, el procesador 151 puede identificar un punto de referencia (p. ej., un máximo local o global, un mínimo local o global, o un

cruce por cero) asociado a lo basado en la señal de correlación calculada utilizando la primera forma de onda de referencia 805 y la señal de entrada 801.

[0040] La primera estimación de la diferencia en el tiempo de propagación de señal (o el punto o los puntos de referencia identificado(s)) puede utilizarse para determinar una estimación precisa de la diferencia en el tiempo de propagación de señal entre la señal de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807 (o dos señales de resolución fina 802 asociadas a dos señales de entrada 801 donde la segunda forma de onda de referencia 807 es una onda sinusoidal o una señal de banda estrecha). El procesador 151 puede localizar un máximo global o local, un mínimo global o local, o un cruce por cero de una primera señal de correlación cruzada calculada utilizando la primera forma de onda de referencia 805 y una señal de entrada 801, como una suposición inicial para determinar una posición más precisa de una máximo global o local correspondiente, un mínimo global o local correspondiente, o un cruce por cero correspondiente en una segunda señal de correlación cruzada calculada utilizando la segunda forma de onda de referencia 807 y una señal de alta resolución 802. Para determinar una estimación precisa de la diferencia en el tiempo de propagación de señal entre la señal de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807 (o dos señales de resolución fina 802 donde la segunda forma de onda de referencia 807 es una onda sinusoidal o una señal de banda estrecha), el procesador 151 puede calcular una segunda señal de correlación cruzada (p. ej., una señal de correlación cruzada parcial) utilizando la señal RX de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807. Al calcular la segunda señal de correlación cruzada, el procesador 151 puede calcular las muestras respectivas asociadas a una intermediación de un punto de referencia en la segunda señal de correlación cruzada calculada utilizando la(s) señal(es) RX de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807. En otras palabras, el procesador 151 puede calcular un subconjunto de las muestras de la segunda señal de correlación cruzada alrededor del punto de referencia. El punto de referencia puede determinarse en función de un punto de referencia correspondiente asociado a la primera señal de correlación cruzada calculada utilizando la señal de entrada 801 y la primera forma de onda de referencia 805.

[0041] La FIG. 8D muestra una ilustración de la primera y la segunda señal de correlación cruzada 830 y 840. El procesador 151 puede determinar un primer punto de referencia 832 asociado a (como el máximo de) la primera señal de correlación cruzada 830 y utilizar el primer punto de referencia 832 para determinar un segundo punto de referencia 842 (como un máximo local) asociado a la segunda señal de correlación cruzada 840. En algunas implementaciones, el procesador 151 puede emplear un valor de desviación 835 (p. ej., determinado durante la calibración del sistema medidor de flujo 100) para determinar el segundo punto de referencia 842 en función del primer punto de referencia 832. En algunas implementaciones, el procesador 151 puede determinar un intervalo de tiempo 846 en función del segundo punto de referencia 842 y puede calcular muestras de la segunda señal de correlación cruzada 840 asociada dentro de ese intervalo de tiempo 846. El intervalo de tiempo 846 puede centrarse en (o incluir) el segundo punto de referencia 842. Al utilizar el intervalo de tiempo 846, el procesador 151 puede calcular un número de valores de correlación cruzada relativamente pequeños al calcular la segunda señal de correlación cruzada.

[0042] Para determinar una estimación precisa de la diferencia de tiempo de propagación de señal, el procesador 151 puede buscar entonces un máximo local (u otra característica como un mínimo local o cruce por cero) de la segunda señal de correlación cruzada 840 en función del intervalo de tiempo 846 (bloque 820 de la FIG. 8A). En algunas implementaciones, el intervalo de tiempo 846 puede definirse para incluir un único máximo local independientemente de su localización dentro de la segunda señal de correlación cruzada 840. El procesador 151 puede determinar el desplazamiento temporal entre la señal RX de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807 (o entre dos señales de resolución fina 802 donde la segunda forma de onda de referencia 807 es una onda sinusoidal o una señal de banda estrecha) en función de el máximo local determinado (u otra característica) de la segunda señal de correlación cruzada 840. Por ejemplo, si el valor máximo local es la muestra de correlación cruzada generada como $\sum r(n) \cdot f(n + \tau)$ donde $r(n)$ es la segunda forma de onda de referencia 807 y $f(n)$ es la señal RX de resolución fina 802, entonces τ es el retardo temporal entre la señal RX de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807. Sin embargo, cuando la segunda forma de onda de referencia 807 es una onda sinusoidal o una señal de banda estrecha, el procesador 151 puede determinar el desplazamiento temporal entre dos señales de resolución fina 802 como el desplazamiento temporal entre los máximos locales (o mínimos locales) correspondientes en dos señales de correlación cruzada calculadas entre las dos señales de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807. En algunas implementaciones, el procesador 151 puede configurarse para deslizar el intervalo de tiempo 846 (y repetir la búsqueda del máximo local) si se determina que el máximo local respectivo (u otra característica de referencia) está en un límite del intervalo de tiempo 846.

[0043] La FIG. 8C muestra un gráfico de correlación cruzada y un diagrama de estado de máquina que ilustra un proceso para determinar un valor de característica de correlación cruzada (como un máximo local o un mínimo local) asociado a un respectivo intervalo de tiempo 846. Dado el intervalo de tiempo 846, el procesador 151 puede calcular todos los valores de correlación cruzada dentro del intervalo de tiempo 846. Como se ha analizado anteriormente con respecto a la FIG. 8B, el procesador 151 puede definir el intervalo de tiempo 846 en función de un primer punto de referencia 832 asociado a la primera señal de correlación cruzada 830. El procesador 151 puede localizar un valor de característica (como un máximo local o un mínimo local) dentro del intervalo de tiempo 846. Si el valor no se encuentra en el límite del intervalo de tiempo 846 (no en I o D), el procesador 151 puede detener el proceso de búsqueda y utilizar la localización determinada del valor de característica para determinar el retardo entre la señal RX de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807. Si se determina que la localización del valor de característica se

encuentra en el límite derecho (en el punto D) del intervalo de tiempo 846, el procesador 151 puede desplazar el intervalo de tiempo 846 a la derecha y volver a empezar el proceso de búsqueda del valor de característica. Si se determina que la localización del valor de característica se encuentra en el límite izquierdo (en el punto I) del intervalo de tiempo 846, el procesador 151 puede desplazar el intervalo de tiempo 846 a la izquierda y volver a empezar el proceso de búsqueda. El desplazamiento del intervalo de tiempo 846 puede incluir el cálculo de valores de correlación cruzada adicionales (p. ej., no calculados previamente). Como se muestra en el diagrama de estado de máquina, el procesador 151 puede detener el proceso de búsqueda si se determina que el máximo de correlación cruzada se localiza (i) en un punto que no es el punto límite del intervalo de tiempo 846, (ii) en el punto límite derecho del intervalo de tiempo 846 después de un desplazamiento a la izquierda o (iii) en el punto límite izquierdo del intervalo de tiempo 846 después de un desplazamiento a la derecha.

[0044] La FIG. 8D es un diagrama que ilustra una búsqueda ternaria para localizar un valor de característica (como un máximo local o un mínimo local) dentro de un intervalo de tiempo 846. El procesador puede configurarse para segmentar el intervalo de tiempo 846 en tres segmentos temporales superpuestos; un segmento izquierdo 847, un segmento central 848 y un segmento derecho 848. En algunas implementaciones, el intervalo de tiempo 846 puede tener una longitud igual a un factor de sobremuestreo UF (o factor de resolución r_f) asociado a la señal RX de resolución fina 802. El procesador 151 puede calcular y comparar valores de correlación cruzada en un punto medio P y en puntos límite I y D del segmento central 848.

[0045] Si se determina que el valor de correlación cruzada asociado al punto límite izquierdo I es el más grande (entre tres valores calculados), el procesador 151 puede subdividir el segmento de tiempo izquierdo 847 en tres subsegmentos superpuestos respectivos (similar a la segmentación del intervalo de tiempo 846). El procesador 151 puede comparar entonces los valores de correlación cruzada asociados a los puntos límite y medio del subsegmento medio dentro del segmento izquierdo 847 (similar a los puntos I, P y D del segmento 848). Si se determina que el valor de correlación cruzada asociado al punto límite derecho D es el más grande (entre tres valores calculados), el procesador 151 puede subdividir el segmento derecho 849 en tres subsegmentos superpuestos respectivos (similar a la segmentación del intervalo de tiempo 846). El procesador 151 puede comparar entonces los valores de correlación cruzada asociados a los puntos límite y medio del subsegmento medio dentro del segmento derecho 849 (similar a los puntos I, P y D del segmento 848). Si se determina que el valor de correlación cruzada asociado al punto medio P es el más grande (entre tres valores calculados), el procesador 151 puede entonces segmentar el segmento central 848 en tres subsegmentos superpuestos y aplicar el mismo proceso de búsqueda a los tres subsegmentos. Es decir, el procesador 151 puede calcular valores de correlación cruzada asociados a los puntos límite y medio del subsegmento central y comparar estos valores para determinar qué segmento se ha de subdividir más en segmentos más pequeños.

[0046] El procesador 151 puede repetir el proceso descrito anteriormente hasta que el subsegmento central no pueda segmentarse más, en cuyo caso se comprueba la localización del valor de correlación cruzada más grande determinado mediante el proceso de búsqueda. Si se encuentra que el valor de correlación cruzada más grande (encontrado por el proceso de búsqueda ternaria) es más pequeño que cualquiera de los valores de correlación cruzada en los puntos límite (como en 0 o UF-1) del intervalo de tiempo original 846, el procesador 151 puede desplazar el intervalo de tiempo 846 hacia el punto límite (como hacia la izquierda o hacia la derecha) con el valor de correlación cruzada más grande y repetir el proceso de búsqueda ternaria para el intervalo de tiempo desplazado. Si se encuentra que el valor de correlación cruzada más grande (determinado por el proceso de búsqueda ternaria) es más grande que ambos valores de correlación cruzada en los puntos límite (como en 0 o UF-1) del intervalo de tiempo original 846, el procesador 151 puede utilizar el valor de correlación cruzada más grande determinado por el proceso de búsqueda ternaria como el máximo local. En algunas implementaciones, el procesador 151 puede configurarse para almacenar valores de correlación cruzada calculados en cada etapa del proceso de búsqueda ternaria para evitar el cálculo repetitivo de un valor de correlación cruzada dado.

[0047] Los procesos analizados con respecto a las FIG. 8A-8D permiten una estimación computacionalmente eficiente del retardo temporal entre la señal RX de resolución fina 802 y la segunda forma de onda de referencia 807. En particular, los procesos analizados permiten una reducción considerable del número de valores de correlación cruzada calculados incluso cuando se emplean señales RX de resolución fina. Además, el procesador 151 puede configurarse para calcular la primera señal de correlación cruzada 830 solo una vez. Una vez que se ha determinado el primer punto de referencia respectivo 832, el procesador 151 puede utilizarlo para todas las señales de resolución fina 802 posteriores para determinar el intervalo de tiempo 846. Por ejemplo, si el primer punto de referencia 832 se determina utilizando una señal de entrada 801 correspondiente a una señal RX aguas abajo respectiva, el procesador 151 puede utilizar el mismo punto de referencia (sin volver a calcular la primera señal de correlación cruzada 830) para posteriores señales RX aguas abajo o aguas arriba para determinar el intervalo de tiempo 846 respectivo.

[0048] En algunas implementaciones, el procesador 151 puede configurarse para calcular varias estimaciones de los retardos entre una pluralidad de señales RX recibidas (p. ej., incluidas las señales RX aguas abajo y/o aguas arriba) y la(s) forma(s) de onda de referencia respectiva(s) 807. Cuando se emplean retardos de fluctuación (como se ha analizado con respecto a la FIG. 3), el procesador 151 puede configurarse para tener en cuenta el retardo añadido al determinar el segundo punto de referencia 842 en función del primer punto de referencia 832. El procesador 151 también puede configurarse para promediar tiempos de propagación de señal estimados en función de dos o más

señales RX (p. ej., asociadas a distintos retardos de fluctuación) para producir una estimación final del tiempo de propagación de señal.

5 **[0049]** Volviendo de nuevo a la FIG. 2, el procesador 151 puede determinar la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido) en función del desplazamiento temporal determinado entre la señal RX de resolución fina 802 y la forma de onda de referencia o entre dos señales de correlación cruzada asociadas a dos señales de resolución fina 802 (etapa 260). El procesador 151 puede emplear una tabla de consulta o una fórmula para calcular la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido). Por ejemplo, la tasa de flujo de agua es proporcional al tiempo de propagación diferencial entre señales aguas abajo y aguas arriba. El procesador 151 puede tener acceso a una estructura de datos (p. ej., una tabla de consulta) mapeando retardos temporales entre señales RX y la forma de onda de referencia a las tasas de flujo de fluido (o velocidades de flujo de fluido) correspondientes. En algunas implementaciones, el mapeo puede depender de la temperatura del fluido o del lumen. Por ejemplo, el sistema de medición de flujo de fluido 100 puede incluir (o acoplarse a) un termostato para medir la temperatura del entorno, el lumen o el fluido en el mismo. En algunas implementaciones, el procesador 151 puede calcular la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido) en función de una fórmula matemática que correlaciona tiempos de propagación diferenciales con tasas de flujo de fluido (o velocidades de flujo de fluido) correspondientes.

15 **[0050]** La FIG. 9 muestra un diagrama de bloques que ilustra otro método para estimar la tasa de flujo de fluido (o velocidad de flujo de fluido) en función de las señales ultrasónicas registradas. El procesador 151 puede hacer una correlación cruzada (bloque 910) de una primera señal RX (p. ej., una señal RX aguas abajo) 901a con una forma de onda de referencia 907 que se genera en función de una segunda señal RX (p. ej., una señal RX aguas arriba) 901b. En algunas implementaciones, la primera y la segunda señal RX 901a y 901b se muestrean a la primera velocidad de muestreo (p. ej., la velocidad de muestreo del ADC 155). En algunas implementaciones, el procesador 151 puede producir la forma de onda de referencia 907 aplicando una operación de intervalo a la segunda señal RX 910b. Es decir, la forma de onda de referencia 907 representa una parte de la segunda señal RX 901b que está asociada a un intervalo de tiempo 950. El procesador 151 puede entonces sobremuestrear la correlación cruzada calculada en función de la primera señal RX 901a y la forma de onda de referencia 907 aplicando la incorporación de ceros (bloque 920) seguido de una interpolación, por ejemplo, utilizando una función sinc truncada (bloque 93). El procesador 151 puede entonces localizar el máximo de la señal de correlación cruzada para determinar el retardo relativo (o tiempo de propagación de señal diferencial) entre la primera y la segunda señal RX 901a y 901b. En algunas implementaciones, el procesador 151 puede aplicar un proceso de búsqueda de intervalo (p. ej., como se ha analizado con respecto a la FIG. 8C para localizar el máximo de correlación cruzada. En algunas implementaciones, la primera señal RX 901 puede ser una señal RX aguas arriba y la segunda señal RX puede ser una señal aguas abajo. En algunas implementaciones, la primera señal RX 901a puede ser una señal aguas abajo o aguas arriba, mientras que la segunda señal RX puede ser una señal RX de flujo cero.

20 **[0051]** En comparación con el método descrito en la FIG. 2, el método descrito en la FIG. 9 implica la generación de una señal RX de resolución fina. La correlación cruzada puede calcularse entre señales muestreadas a la velocidad de muestreo del ADC 155. Sin embargo, la señal de correlación cruzada calculada puede sobremuestrearse para lograr una mejor estimación del retardo temporal relativo entre la primera y la segunda señal RX 901 y 901b.

25 **[0052]** Aunque los sistemas, dispositivos y métodos de la presente exposición se describen en términos de transductores ultrasónicos, los sensores de tasa de flujo alternativos pueden incluir sensores de campo magnético, sensores acústicos u otros sensores capaces de detectar otros tipos de señales que se propaguen a través de un fluido en un lumen. Los sistemas, dispositivos y métodos descritos en la presente exposición pueden utilizarse para medir tasas de flujo en sistemas de distribución de fluido como sistemas de distribución de agua, sistemas de distribución de gas natural, sistemas de distribución de petróleo u otros sistemas de distribución de fluido utilizados en diferentes industrias.

30 **[0053]** Aunque la invención se ha mostrado y descrito en particular con referencia a modos de realización específicos, los expertos en la materia deben entender que pueden realizarse diversos cambios en la forma y en los detalles sin alejarse del alcance de la invención según se define en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de medición de flujo de fluido (100) que comprende:

un sensor, fijado a una estructura que define un lumen (10), incluyendo el sensor:

5 (i) un primer transductor (110a) configurado para transmitir de forma consecutiva una pluralidad de copias de una señal de transmisión (TX) ultrasónica a través de un fluido que fluye a través del lumen (10);

10 (ii) un segundo transductor (110b) para recibir una pluralidad de señales (RX) ultrasónicas correspondientes a la pluralidad de copias transmitidas de la señal TX ultrasónica, un convertidor analógico-digital (155) configurado para muestrear, en una primera frecuencia, la pluralidad de señales RX ultrasónicas recibidas por el segundo transductor (110b), transmitiéndose la pluralidad de copias de la señal TX ultrasónica con distintos retardos temporales con respecto a periodos de una señal de reloj del convertidor analógico-digital (155); y

un procesador (151) configurado para:

15 generar una señal de resolución fina utilizando versiones muestreadas de la pluralidad de señales RX ultrasónicas generadas por el convertidor analógico digital (155), estando la señal de resolución fina asociada a una segunda velocidad de muestreo más alta que la primera velocidad de muestreo;

calcular una señal de correlación cruzada indicativa de una correlación cruzada entre la señal de resolución fina y una forma de onda de referencia; y

determinar una estimación de un parámetro de flujo de fluido del fluido en función de la señal de correlación cruzada calculada.

20 **2.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 1, donde el parámetro de flujo de fluido incluye una tasa de flujo de fluido o velocidad de flujo de fluido; o el procesador (151) está configurado para determinar múltiples estimaciones del parámetro de flujo de fluido en función de señales RX ultrasónicas aguas arriba y aguas abajo.

3. Sistema de medición de flujo de fluido de la reivindicación 1, donde la pluralidad de copias de la señal TX ultrasónica se transmiten con distintos retardos de fluctuación con respecto a los periodos de la señal de reloj del convertidor analógico-digital (155), y el procesador (151) está configurado para:

25 determinar múltiples primeras estimaciones del parámetro de flujo de fluido en función de la pluralidad de señales RX ultrasónicas correspondientes a las copias de la señal TX ultrasónica transmitida con distintos retardos de fluctuación con respecto a los periodos de la señal de reloj del convertidor analógico-digital (155), y

generar una estimación final del parámetro de flujo de fluido promediando las múltiples primeras estimaciones.

30 **4.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 1, donde la generación de una señal de resolución fina incluye el sobremuestreo de una señal asociada a las versiones muestreadas de la pluralidad de señales RX ultrasónicas, incluyendo el sobremuestreo la aplicación de una interpolación utilizando una función sinc truncada.

5. Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 1, donde la pluralidad de copias de la señal TX ultrasónica se transmiten con distintos retardos graduales con respecto a los periodos de la señal de reloj del convertidor analógico-digital (155), y

35 donde el procesador (151) está configurado para generar la señal de resolución fina para intercalar muestras de la pluralidad de señales RX ultrasónicas correspondientes a la pluralidad de copias de la señal TX ultrasónica transmitida con distintos retardos graduales con respecto a los periodos de la señal de reloj del convertidor analógico-digital.

40 **6.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 5, donde la generación de la señal de resolución fina incluye además el sobremuestreo de una señal intercalada generada intercalando las muestras de la pluralidad de señales RX ultrasónicas correspondientes a la pluralidad de copias de la señal TX ultrasónica transmitida con distintos retardos graduales con respecto a los periodos de la señal de reloj del convertidor analógico-digital (155).

7. Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 1, donde

la forma de onda de referencia se asocia a una señal RX ultrasónica recibida por el primer transductor (110a) en respuesta a la transmisión de una copia de la señal TX ultrasónica por el segundo transductor (110b);

45 la forma de onda de referencia representa un componente de señal asociado a la señal TX ultrasónica; o

la forma de onda de referencia se asocia a una señal RX ultrasónica de flujo cero; o

la forma de onda de referencia es una onda sinusoidal o una señal de banda estrecha.

8. Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 1, donde al calcular la señal de correlación cruzada, el procesador está configurado para:
- calcular una primera señal de correlación cruzada entre una primera forma de onda de referencia y una señal asociada a las versiones muestreadas de la pluralidad de señales RX ultrasónicas;
- 5 determinar un intervalo de tiempo en función de la primera señal de correlación cruzada;
- calcular la señal de correlación cruzada, incluyendo la señal de correlación cruzada una pluralidad de valores de correlación cruzada asociados al intervalo de tiempo e indicativos de una correlación cruzada entre la forma de onda de referencia y la señal de resolución fina.
- 10 **9.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 8, donde, al determinar el intervalo de tiempo, el procesador está configurado para:
- determinar un primer punto de referencia asociado a la primera señal de correlación cruzada;
 - determinar un segundo punto de referencia asociado a la señal de correlación cruzada en función del primer punto de referencia; y
 - determinar el intervalo en función del segundo punto de referencia.
- 15 **10.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 8, donde
- la primera forma de onda de referencia se obtiene anulando muestras de la forma de onda de referencia que son inferiores a un valor umbral; o
 - la señal asociada a la pluralidad de señales RX ultrasónicas incluye al menos una de entre una señal RX ultrasónica, una versión sobremuestreada de una señal RX ultrasónica, una versión intercalada de una pluralidad de señales RX ultrasónicas y la señal de resolución fina.
- 20 **11.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 8, donde, el procesador (151) está configurado además para:
- localizar un valor de correlación cruzada máximo de la pluralidad de valores de correlación cruzada dentro del intervalo de tiempo;
- 25 en respuesta a la localización del valor de correlación cruzada máximo en un punto límite del intervalo de tiempo, desplazar el intervalo de tiempo hacia ese punto límite; y
- en respuesta a la localización del valor de correlación cruzada máximo dentro del intervalo de tiempo, determinar un segundo retardo temporal entre la forma de onda de referencia y la señal de resolución fina utilizando una localización de la correlación cruzada máxima dentro del intervalo de tiempo.
- 30 **12.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 11, donde la localización de un valor de correlación cruzada máximo dentro del intervalo de tiempo incluye la aplicación de un proceso de búsqueda ternaria.
- 35 **13.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 11, donde el procesador (151) está configurado para:
- determinar la estimación del parámetro de flujo de fluido en función del segundo retardo temporal; o
 - determinar la estimación del parámetro de flujo de fluido en función del segundo retardo temporal utilizando una tabla de consulta.
- 40 **14.** Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 1, donde la forma de onda de referencia es una onda sinusoidal o una señal de banda estrecha, y el procesador (151) está configurado para:
- generar una primera señal de resolución fina y una segunda señal RX de resolución fina en función de la pluralidad de señales RX ultrasónicas, estando la primera y la segunda señal de resolución fina asociadas a la segunda velocidad de muestreo superior a la primera velocidad de muestreo;
 - calcular una primera señal de correlación cruzada indicativa de una correlación cruzada entre la primera señal de resolución fina y la forma de onda de referencia;
- 45 calcular una segunda señal de correlación cruzada indicativa de una correlación cruzada entre la segunda señal de resolución fina y la forma de onda de referencia; y
- determinar la estimación del parámetro de flujo de fluido del fluido en función de la primera y la segunda señal de correlación cruzada calculada.

15. Sistema de medición de flujo de fluido (100) de la reivindicación 1, donde el procesador (151) está configurado para:
- generar la señal de resolución fina como una versión filtrada de una o más señales RX ultrasónicas correspondientes utilizando un filtro pasabanda;
 - filtrar la forma de onda de referencia utilizando el filtro pasabanda; y
- 5 calcular la señal de correlación cruzada utilizando la señal de resolución fina generada como una versión filtrada de la pluralidad de señales RX ultrasónicas, y la forma de onda de referencia filtrada.

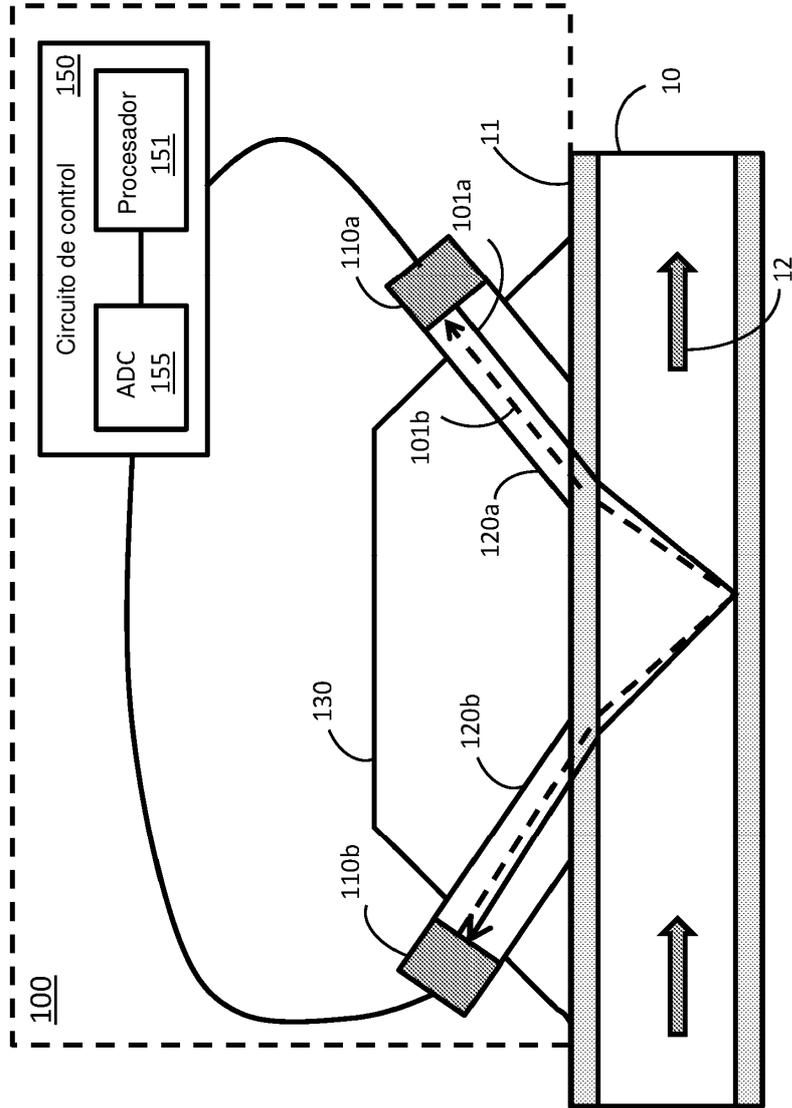


FIG. 1

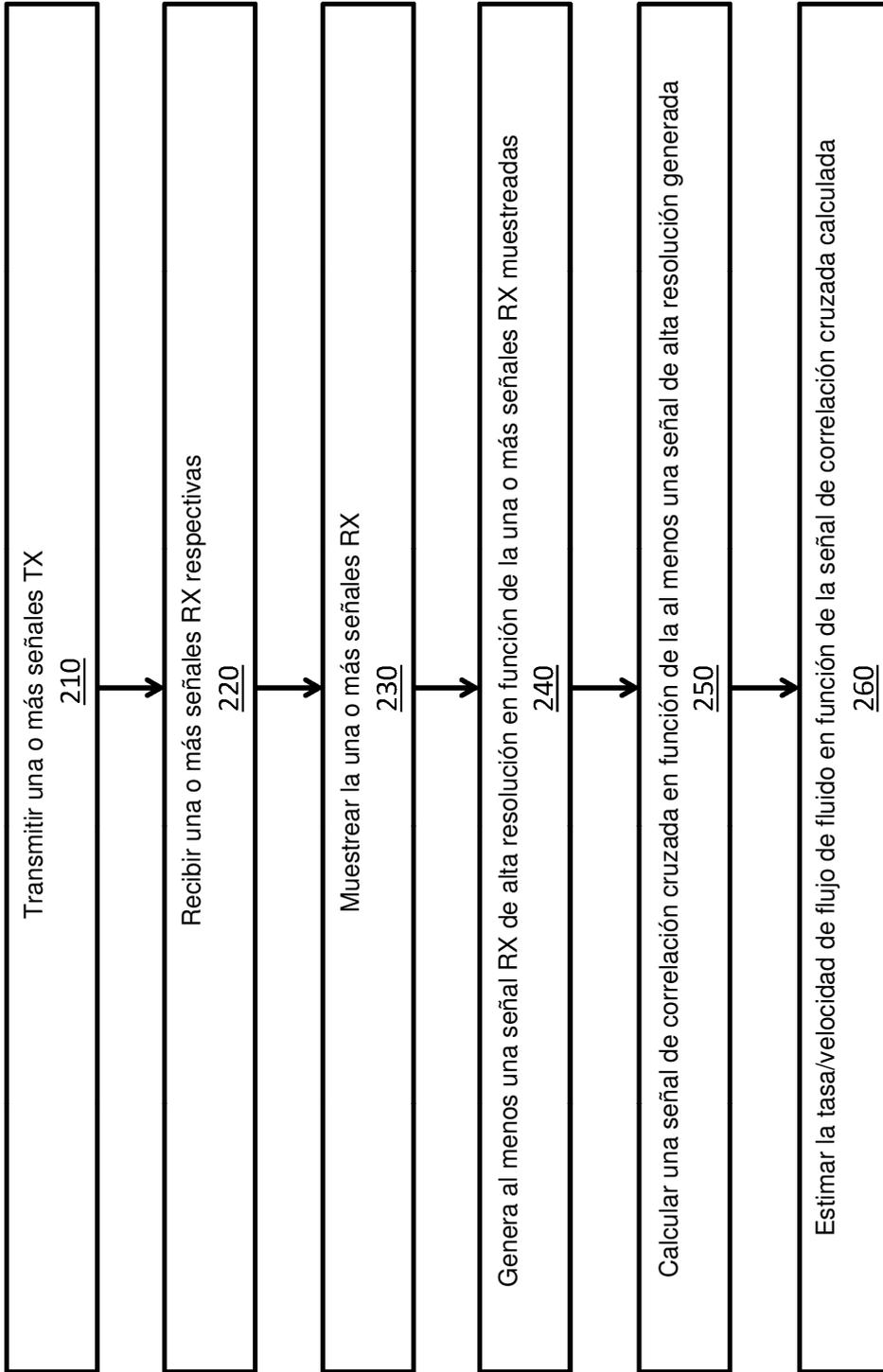


FIG. 2

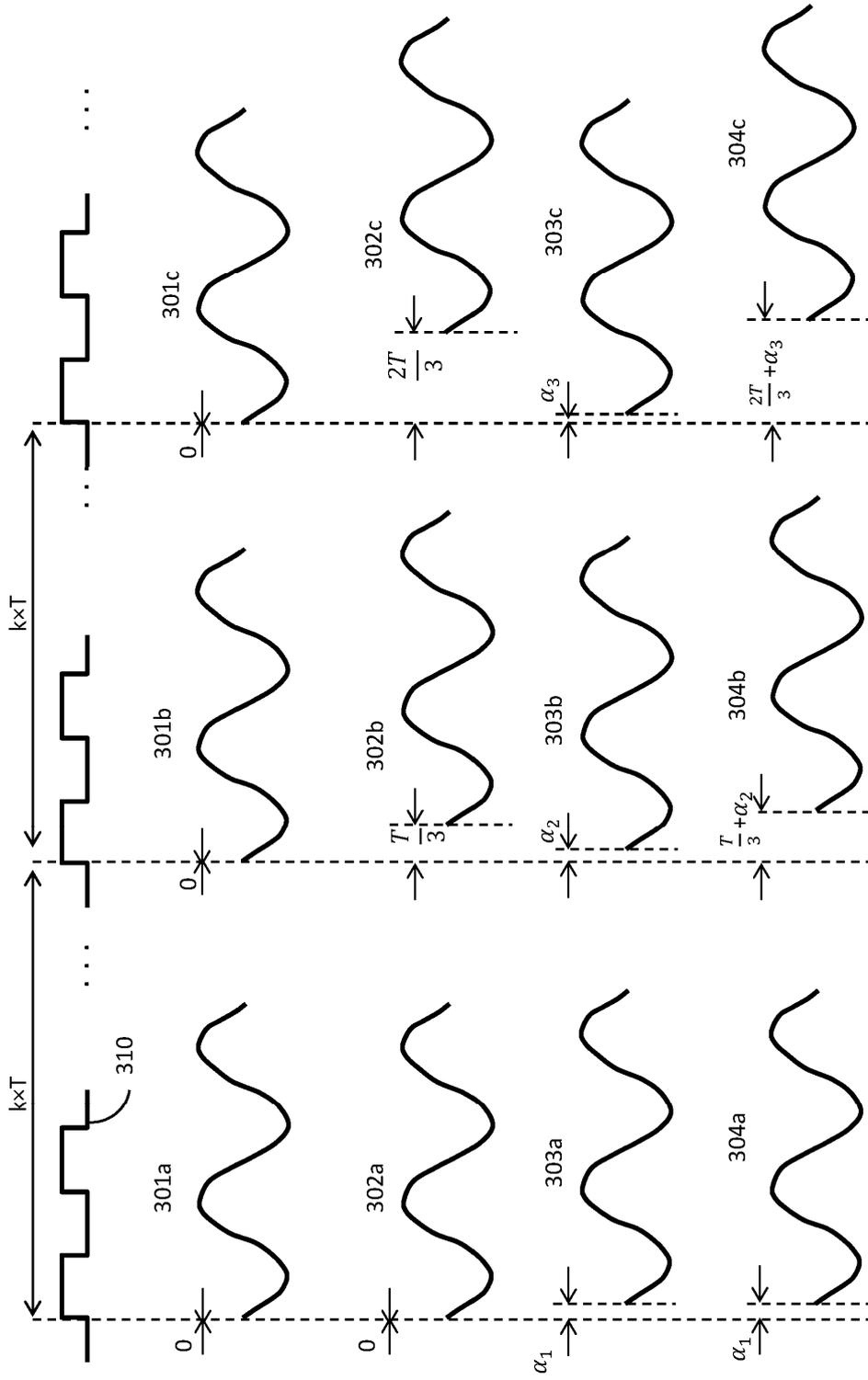


FIG. 3

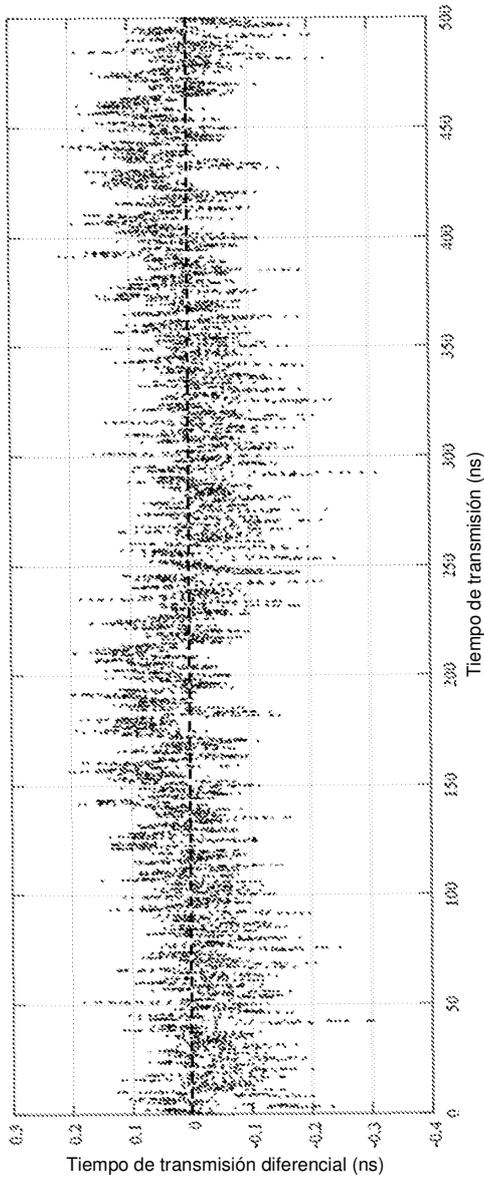


FIG. 4A

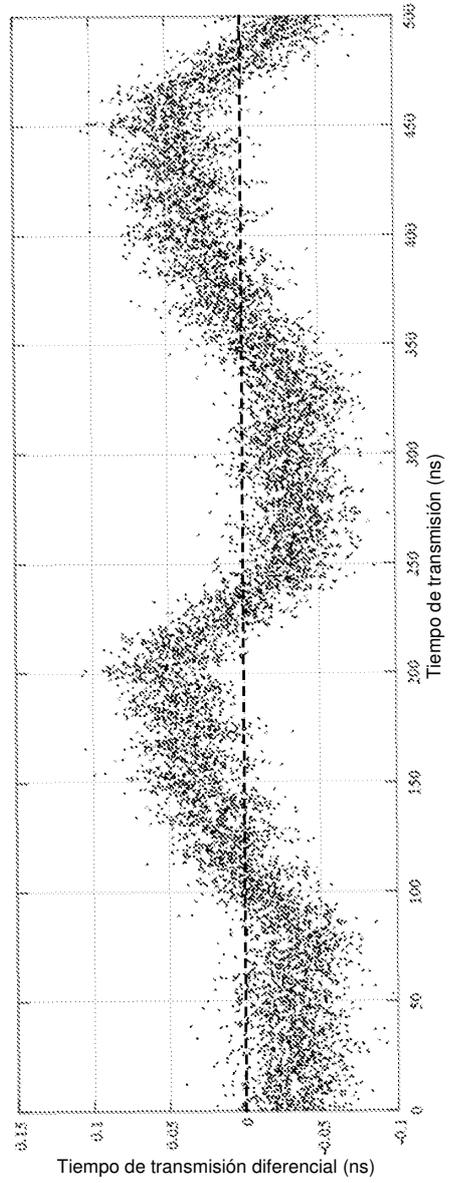


FIG. 4B

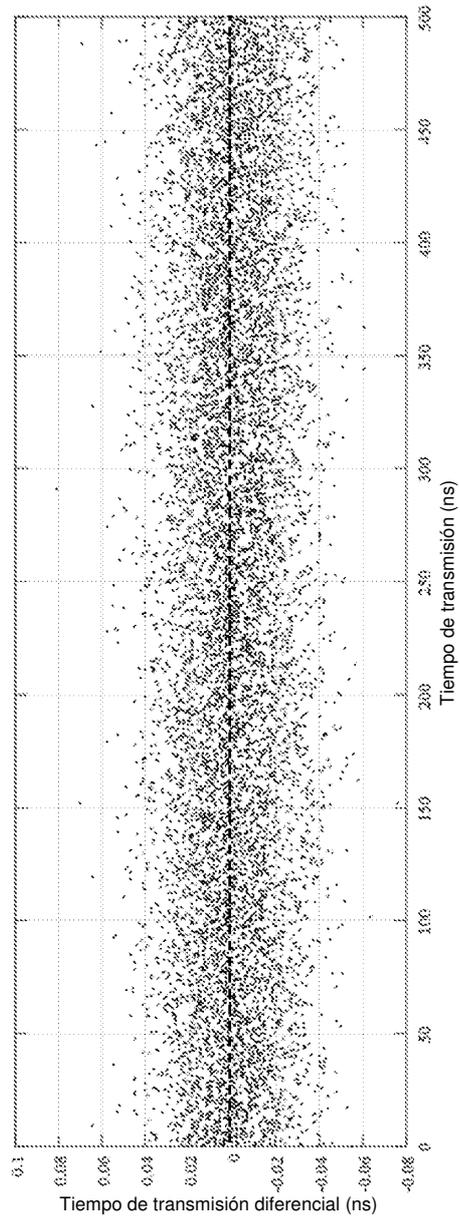


FIG. 4C

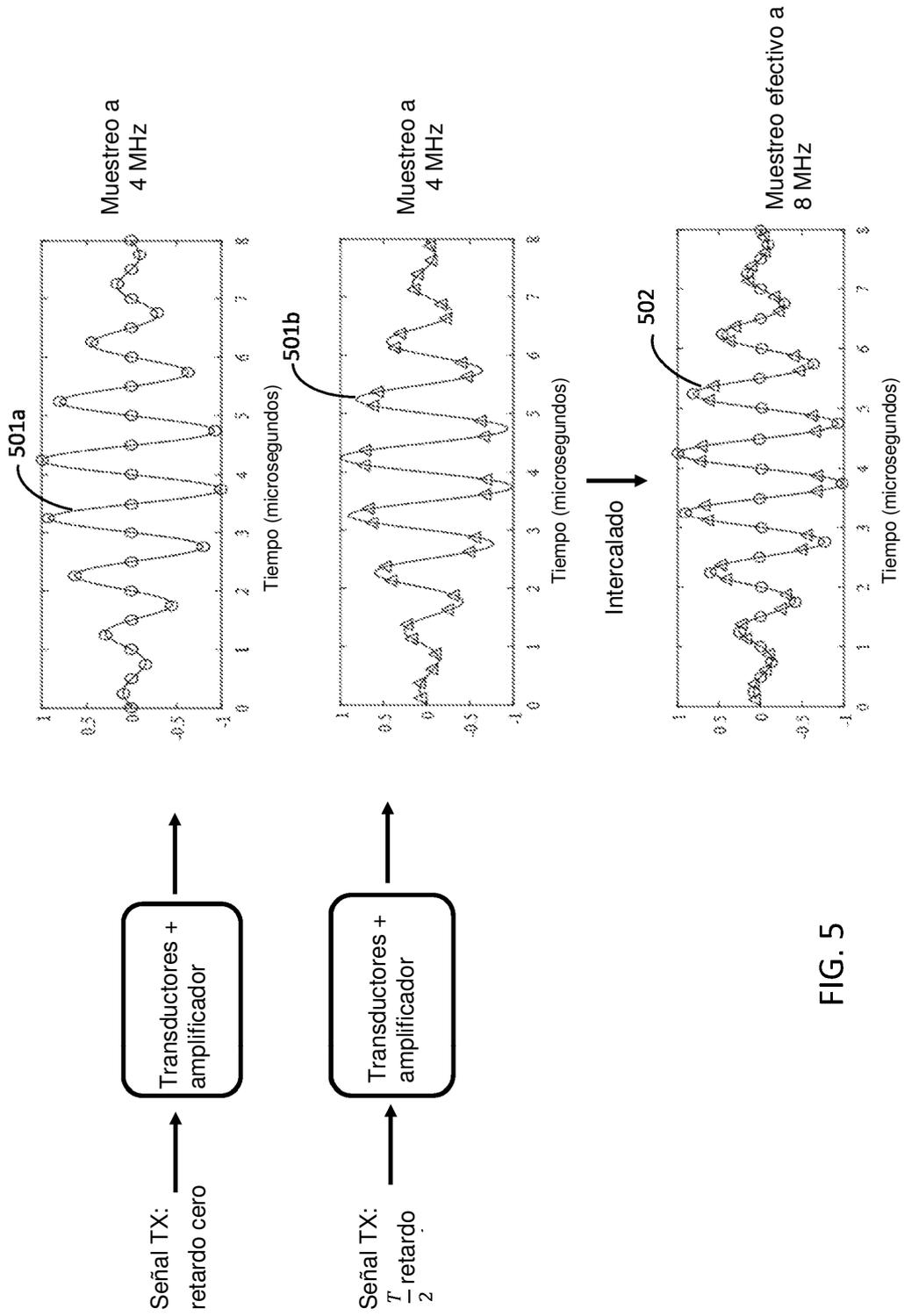


FIG. 5

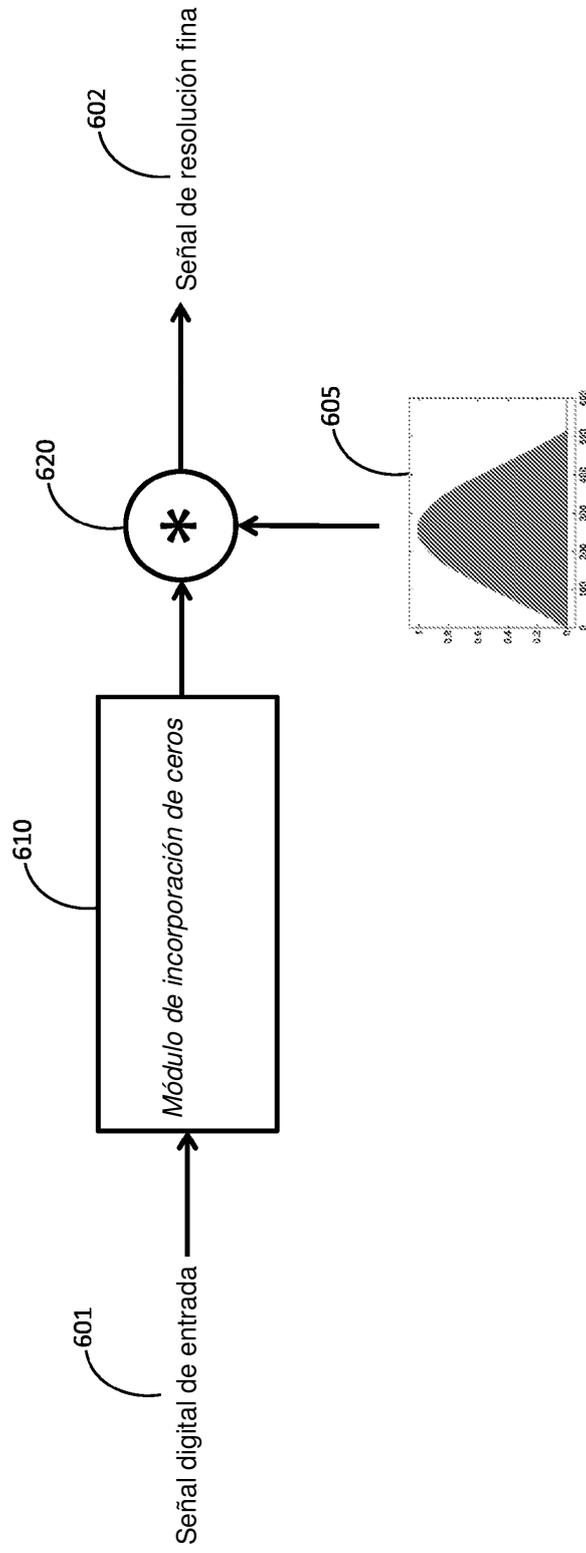
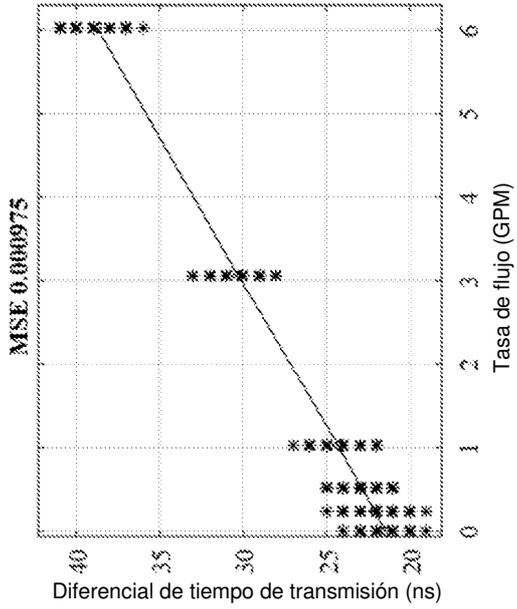
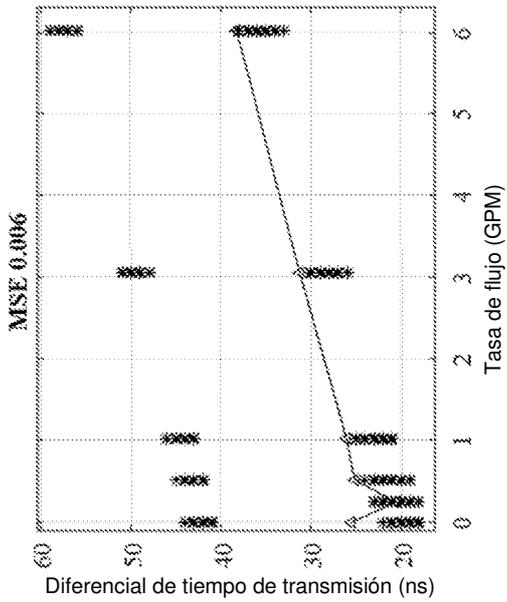


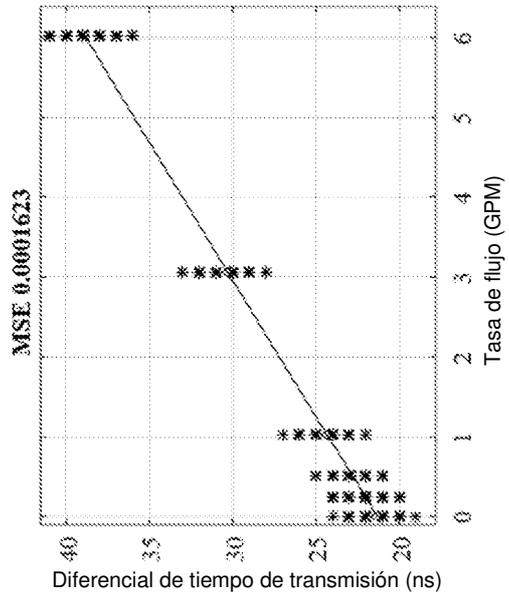
FIG. 6



(b)



(a)



(c)

FIG. 7

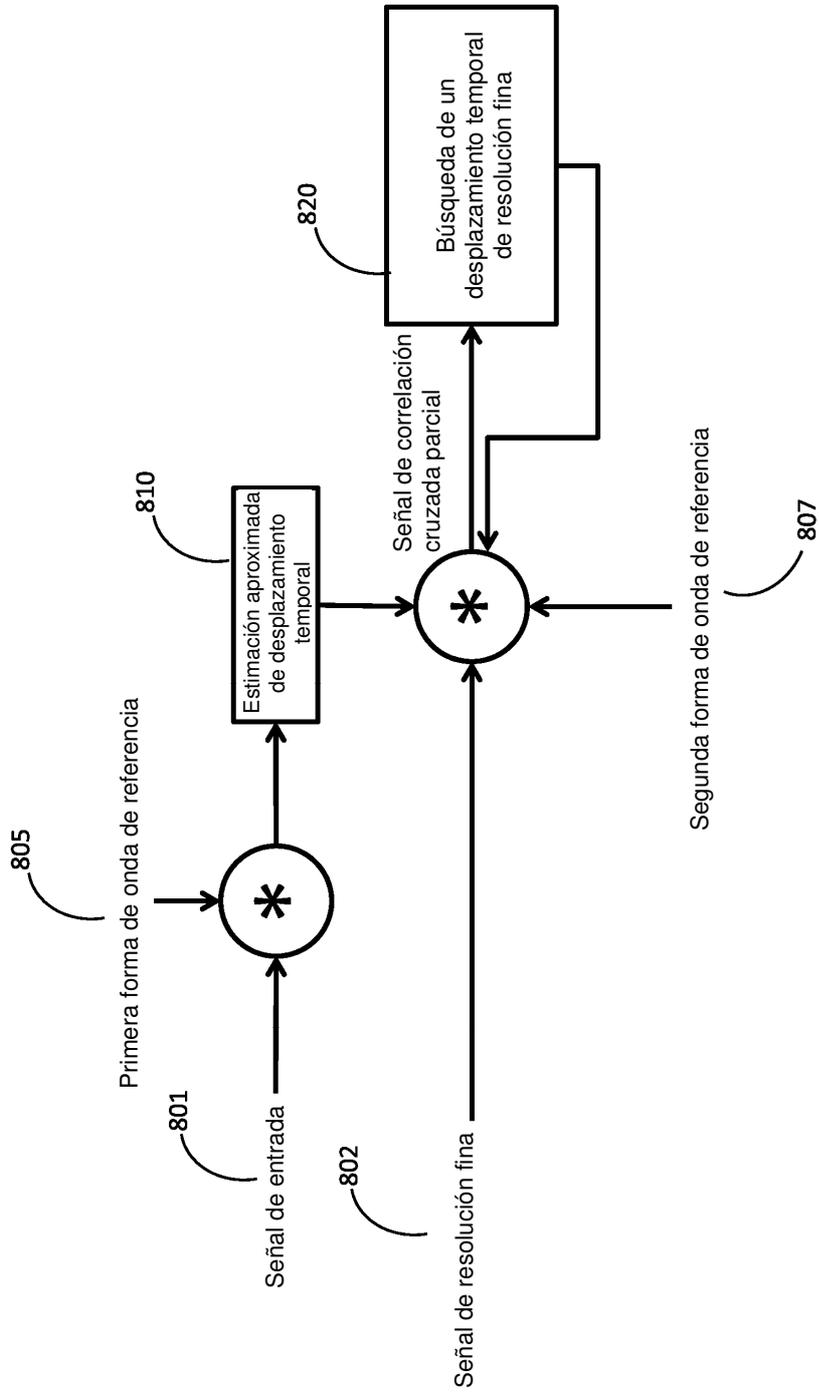


FIG. 8A

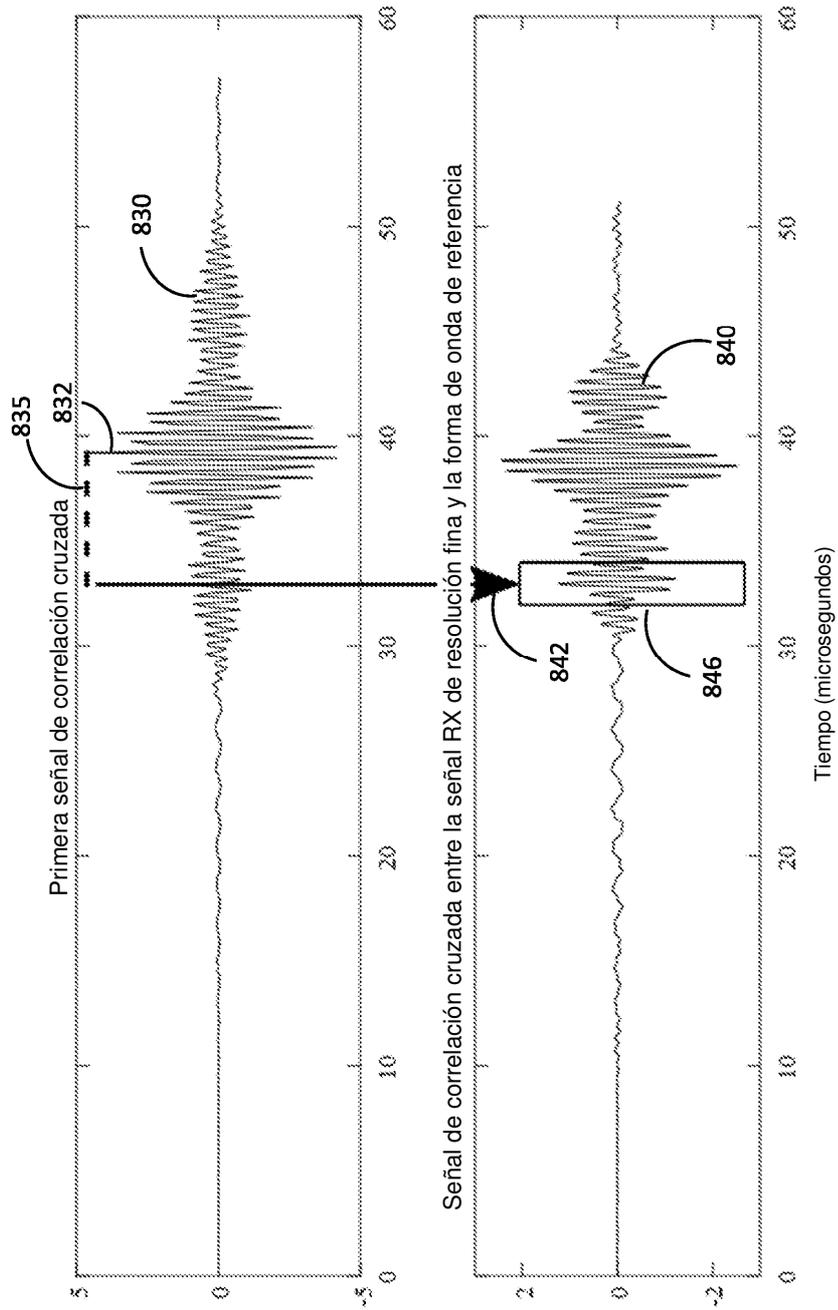


FIG. 8B

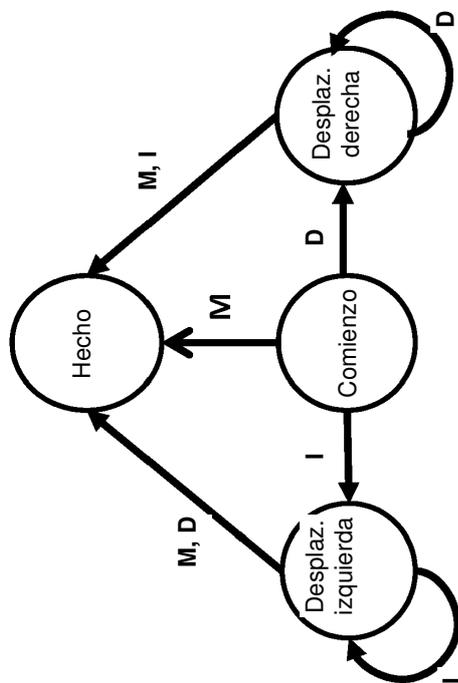
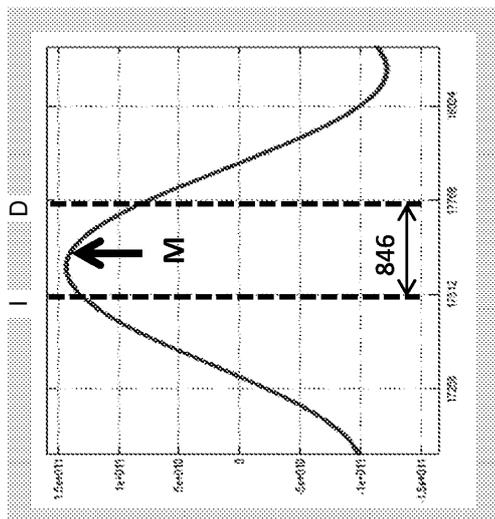


FIG. 8C

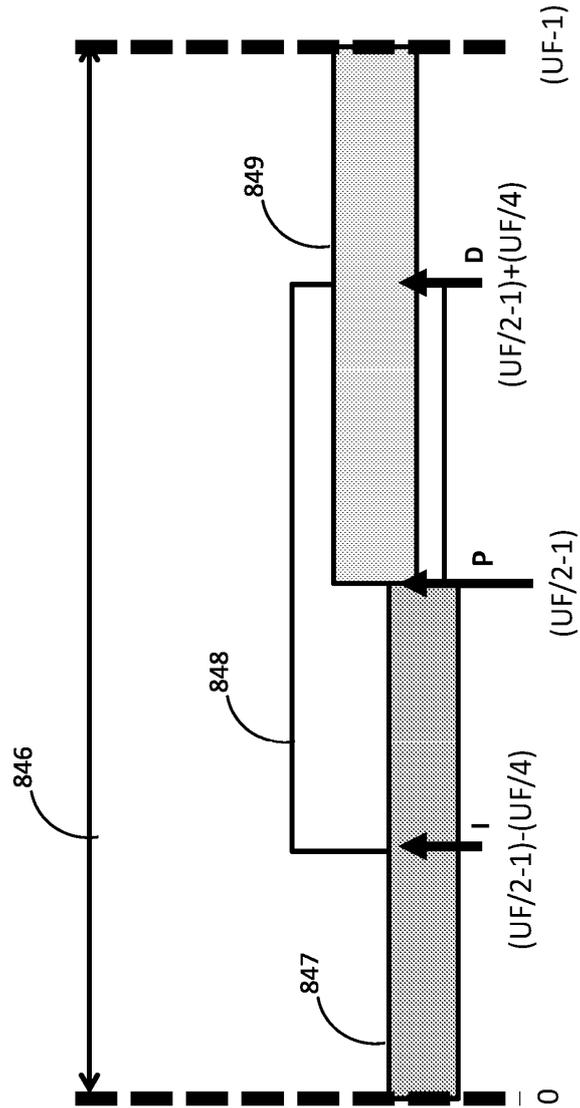


FIG. 8D

