

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 895 879**

51 Int. Cl.:

**G01D 5/353** (2006.01)

**G01M 11/00** (2006.01)

**G01K 11/32** (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.06.2016 PCT/EP2016/064851**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.01.2018 WO18001450**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.06.2016 E 16739040 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.08.2021 EP 3475662**

54 Título: **Dispositivo de calibración para tecnologías de detección de distribución**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**22.02.2022**

73 Titular/es:  
**OMNISENS S.A. (100.0%)**  
**Riond-Bosson 3**  
**1110 Morges, CH**

72 Inventor/es:  
**MOREL, JACQUES y**  
**ROCHAT, ETIENNE**

74 Agente/Representante:  
**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 895 879 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

Dispositivo de calibración para tecnologías de detección de distribución

**Campo técnico**

La presente invención se refiere a un dispositivo de calibración para tecnologías de detección de distribución.

- 5 La invención también se refiere a un proceso implementado mediante un dispositivo según la invención.

**Estado de la técnica**

El artículo "*Cavity ring-down technique for remote sensing. A proof-of-concept for displacement measurement*", de Silva et al. (Proc. Of SPIE vol. 9916 991615-1) describe una configuración para la detección remota para la medición de desplazamiento utilizando la técnica de cavidad en anillo (CRD).

- 10 El documento GB 2 289 331 describe un aparato para detectar la temperatura o la tensión en una fibra óptica de detección.

El artículo "*Fiber Loop Ringdown – a Time-Domain Sensing Technique for Multi-Function Fiber Optic Sensor Platforms: Current Status and Design Perspectives*" de Wang et al. (Sensors 2009, 9, 7595-7621; doi: 10.3390/s91007595) describe una técnica de detección en el dominio del tiempo para plataformas de detectores de fibra óptica multifunción, con anillo de bucle de fibra.

- 15 El artículo "*Micro-Displacement sensor combined with a fiber ring interrogated by an optical time-Domain Reflectometer*" de Mikel Bravo et al. IEEE Sensors Journal, vol.14, n.3, marzo de 2014, describe el uso de un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo.

- 20 Cuando un potente pulso de luz de longitud de onda  $\lambda_0$  (o frecuencia  $\nu_0 = c/\lambda_0$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz), conocido como la bomba, se propaga a través de una fibra óptica, una pequeña cantidad de la potencia incidente se dispersa en todas las direcciones debido a las inhomogeneidades locales. Solo la dispersión hacia delante y hacia atrás es relevante en las fibras ópticas monomodo, ya que la luz dispersada en otras direcciones no es guiada. La retrodispersión es de particular interés ya que se propaga hacia el extremo de la fibra en el que se lanzó originalmente la luz láser. Las técnicas de detección de distribución se basan en el análisis de la señal retrodispersada creada en diferentes lugares a lo largo de la fibra ([1]; [2]; [3]).

- 25 Los procesos de dispersión se originan a partir de impurezas materiales (dispersión de Rayleigh), ondas acústicas excitadas térmicamente (dispersión de Brillouin) o vibraciones moleculares (dispersión de Raman).

- 30 La dispersión de Rayleigh es la interacción de un pulso de luz con impurezas materiales (un ejemplo típico sería la dispersión de la luz solar por partículas de polvo en la atmósfera que dan al cielo diferentes colores según el ángulo de incidencia de la luz solar). Es la más grande de las tres señales retrodispersadas en fibras de sílice y tiene la misma longitud de onda que la luz incidente. La dispersión de Rayleigh es el principio físico detrás del "Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo" (también llamado OTDR), la "Detección Acústica Distribuida" (también llamada DAS). También se puede utilizar para medir la temperatura y la deformación.

- 35 La dispersión de Brillouin es la interacción de un pulso de luz con ondas acústicas excitadas térmicamente (también llamadas fonones acústicos). Las ondas acústicas, a través del efecto elasto-óptico, modifican leve y localmente el índice de refracción. La rejilla móvil correspondiente refleja una pequeña cantidad de la luz incidente y cambia su frecuencia (o longitud de onda) debido al efecto Doppler. El desplazamiento depende de la velocidad acústica en la fibra, mientras que su signo (desplazamiento positivo o negativo) depende de la dirección de propagación de las ondas acústicas que viajan. Por lo tanto, la retrodispersión de Brillouin se crea en dos frecuencias diferentes alrededor de la luz incidente, llamadas componentes Stokes y Anti-Stokes. En las fibras de sílice, el desplazamiento de frecuencia de Brillouin está en el intervalo de 10 GHz (0,08 nm en el intervalo de longitud de onda de 1550 nm) y depende de la temperatura y la deformación ("Detección de Temperatura Distribuida" también llamada DTS y "Detección de Deformación Distribuida" también llamada DSS).

- 45 La dispersión Raman es la interacción de un pulso de luz con vibraciones moleculares térmicamente excitadas (fonones ópticos) y es la más pequeña de las tres señales retrodispersadas en intensidad. La dispersión Raman exhibe un gran desplazamiento de frecuencia de, normalmente, 13 THz en fibras de sílice, correspondiente a 100 nm a una longitud de onda de 1550 nm. La intensidad del componente Raman Anti-Stokes depende de la temperatura, mientras que el componente Stokes es casi insensible a la temperatura, por lo que es posible la medición de temperatura (DTS).

- 50 La retrodispersión se genera mediante una señal de bombeo (pulso óptico de unos pocos nanosegundos de duración) que se propaga a lo largo de la fibra. Debido a la naturaleza pulsada de la bomba, la señal de retrodispersión se genera continuamente a lo largo de la fibra y llega al detector después de un retardo de tiempo igual al doble del tiempo de viaje desde la entrada de la fibra hasta la ubicación especificada.

Por lo tanto, supervisar la intensidad de la retrodispersión, independientemente de su tipo, con respecto al tiempo,

mientras se conoce la velocidad de la luz en la fibra, proporciona información sobre la posición donde tuvo lugar la dispersión. Esta medición del tiempo de vuelo es clave para todos los sistemas de reflectómetro en el dominio del tiempo.

5 Los métodos de calibración existentes para reflectómetros ópticos en el dominio del tiempo, por ejemplo, la línea de retardo de recirculación descrita en IEC 61746 Calibración de "reflectómetros ópticos en el dominio del tiempo" (también llamados OTDR) ilustrados en la figura 16, solo abordan la escala de distancia. En este método de calibración según la técnica anterior, un pulso OTDR 161 se lanza en una fibra óptica 162, se divide por un acoplador 163, pasa directamente o a través de un bucle 164 a un elemento reflectante 165 y regresa usando ambas trayectorias. La traza correspondiente (intensidad o pérdida en función de la distancia) está formada por picos agudos cuyo espaciado  
10 corresponde a la mitad de la longitud del bucle. Siempre que la longitud del bucle se caracterice correctamente, esto permite calibrar o evaluar la calidad de calibración del OTDR. Este método según la técnica anterior se limita a la medición de distancias y no permite calibrar parámetros importantes como la resolución espacial o la respuesta absoluta del instrumento a parámetros como temperatura, deformación o vibraciones.

15 El objetivo de la invención es presentar un método para calibrar tecnologías de detección de distribución y un dispositivo de calibración para tecnologías de detección de distribución que no se limitan a la medición de la distancia.

**Compendio de la invención**

Un aspecto de la invención se refiere a un proceso de calibración según la reivindicación 1. Otras características inventivas opcionales se citan en las reivindicaciones dependientes.

**Descripción detallada de las figuras y modos de realización de la invención**

20 Las figuras 1 a 17 muestran ejemplos que no están incluidos en el alcance de la invención, incluso aunque se denominen "realizaciones" en las partes correspondientes de la descripción. El alcance de la protección está definido por las reivindicaciones.

- La figura 1 ilustra un primer ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- 25 – La figura 2 ilustra un segundo ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- La figura 3 ilustra un tercer ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- 30 – La figura 4 ilustra un cuarto ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- La figura 5 es una vista esquemática del dispositivo 10 de la figura 3 o 4, que ilustra además dos posibles posiciones de un evento 9,
- La figura 6 ilustra las señales de retrodispersión obtenidas con el dispositivo 10 de la figura 5,
- 35 – La figura 7 ilustra las ganancias de Brillouin de las fibras utilizadas en los posibles ejemplos del al menos un evento 9 de la figura 8,
- La figura 8 ilustra un posible ejemplo del al menos un evento 9,
- Las figuras 9 y 10 ilustran las señales retrodispersadas 821, 822, 823, 824, 825 correspondientes a los eventos 921, 922, 923, 924, 925, respectivamente, de la figura 8,
- 40 – La figura 11 ilustra un quinto ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- La figura 12 ilustra un sexto ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- La figura 13 ilustra un séptimo ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- 45 – La figura 14 ilustra un octavo ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.
- La figura 15 ilustra un noveno ejemplo de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención, y
- La figura 16 ilustra un dispositivo de calibración según la técnica anterior.

- Estos ejemplos no son limitativos de ninguna manera, pudiéndose considerar variantes de la invención que incluyen solo una selección de características descritas o ilustradas posteriormente, aisladas de otras características descritas o ilustradas (incluso si esta selección se toma de una oración que contiene estas otras características), si esta selección de características es suficiente para dar una ventaja técnica o para distinguir la invención del estado de la técnica. Esta selección incluye al menos una característica, preferiblemente una característica funcional sin detalles estructurales, o con solo una parte de los detalles estructurales si esa parte es suficiente para dar una ventaja técnica o para distinguir la invención sobre el estado de la técnica.
- 5 Se describen a continuación las características comunes de todas las realizaciones de las figuras 1 a 15 que implementan un proceso de calibración según la invención.
- 10 En estas realizaciones de un dispositivo 10 de calibración óptica que implementa un proceso de calibración según la invención, el dispositivo 10 comprende una fibra óptica 8.
- Esta fibra 8 es normalmente una fibra monomodo con un núcleo normalmente de 9 micrómetros diseñado para una longitud de onda láser de 1550 nm.
- El dispositivo también comprende una primera entrada 11 o conector 11.
- 15 La primera entrada 11 está dispuesta para:
- estar conectada a un primer emisor 61 dispuesto para emitir al menos un pulso óptico 5,
  - recibir este al menos un pulso óptico 5,
  - inyectar este al menos un pulso óptico 5 hacia la fibra óptica 8. El dispositivo comprende además una salida 13 dispuesta para:
- 20 - recibir una señal retrodispersada generada en la fibra óptica 8,
- estar conectada a medios de análisis 63 dispuestos para analizar la señal retrodispersada generada en la fibra óptica 8.
- Cada señal de pulso 5 es una señal de luz, preferiblemente una señal de luz láser, que normalmente tiene una longitud de onda entre 1530 nm y 1560 nm.
- 25 El primer emisor 61 y/o los medios de análisis 63 son normalmente partes de un aparato 101 de tecnología de detección de distribución que se va a ensayar o calibrar.
- La fibra óptica 8 comprende al menos un evento 9, siendo cada evento 9 parte de la fibra óptica 8 y teniendo al menos un estado físico o propiedad modificados que son diferentes del estado físico o propiedad del resto de la fibra óptica 8.
- 30 El dispositivo 10 comprende medios 7, 25, 27, 28, 29, 30 para crear diferentes trayectorias ópticas para el al menos un pulso óptico 5, tendiendo las diferentes trayectorias ópticas diferentes longitudes, pasando cada trayectoria óptica a través del al menos un evento 9.
- En el dispositivo 10, la señal de retrodispersión es una señal de retrodispersión de Rayleigh, una señal de retrodispersión de Brillouin o una señal de retrodispersión Raman dependiendo del aparato 101 ensayado.
- 35 En el dispositivo 10:
- el al menos un evento 9 comprende una parte de fibra óptica que tiene al menos un estado físico diferente en comparación con el resto de la fibra óptica 8, siendo este al menos un estado físico diferente una temperatura, una deformación, una presión, una vibración acústica; y/o el dispositivo 10 comprende medios 99 para aplicar, al menos a un evento 9, al menos un estado físico conocido, comprendiendo los medios 99 para aplicar al menos un estado físico conocido, por ejemplo, un termostato, medios para aplicar una presión o fuerza o deformación conocidas, y/o medios para aplicar una vibración conocida; y/o
  - el al menos un evento 9 comprende una parte de fibra óptica que tiene al menos una propiedad física diferente en comparación con el resto de la fibra óptica 8, siendo esta al menos una propiedad física diferente, por ejemplo, una dimensión espacial (diámetro del núcleo), un material (por ejemplo: vidrio de sílice puro o vidrio de sílice dopado con GeO<sub>2</sub>), un índice de refracción o propiedades de birrefringencia (por ejemplo, una diferencia de índice de refracción de  $10 \times 10^{-6}$ ).
- 40 Los medios 99 para aplicar un estado físico conocido son, por ejemplo, un horno en el caso de la temperatura, un mecanismo de compresión en el caso de la fuerza, una cámara de presión alrededor del evento 9 en el caso de la presión, un cilindro piezoeléctrico alrededor del cual se produce se enrolla el evento en caso de tensión o vibración.
- 45
- 50 En el dispositivo 10, la primera entrada 11 y la salida 13 están ubicadas en la misma ubicación.

Se puede hacer distinción ahora entre dos familias de realizaciones: las realizaciones que comprenden un bucle y las realizaciones sin bucle.

Se describen ahora las características comunes de las realizaciones con "bucle" de las figuras 1 a 13 que implementan un proceso de calibración según la invención. En estas realizaciones, los medios para crear diferentes trayectorias ópticas comprenden:

- 5     – un acoplador 6,
- un bucle óptico 7 de fibra óptica,

estando insertado el acoplador 6 en el bucle óptico 7 (insertado ópticamente, es decir, insertado en la trayectoria óptica del bucle 7), y estando dispuesto de tal manera que:

- 10    – si una señal óptica (normalmente un pulso 5) entra dentro del acoplador 6 desde el bucle 7 con una primera dirección de circulación 21, esta señal óptica es al menos parcialmente reinyectada en el bucle 7 con la primera dirección de circulación 21 (y no es expulsado o casi no es expulsado parcialmente fuera del bucle 7 hacia la salida 13 y/o hacia los medios de análisis),
- 15    – si una señal óptica (normalmente una sonda 55) entra dentro del acoplador 6 desde el bucle 7 con una segunda dirección de circulación 22, esta señal óptica es expulsada al menos parcialmente fuera del bucle 7 hacia la salida 13 y/o hacia los medios de análisis 63.

En estas realizaciones, la fibra óptica 8 comprende dos partes:

- una parte 8a está fuera del bucle óptico 7 y tiene una longitud típica de 10 m y
- una parte 8b está dentro del bucle óptico 7 y tiene una longitud típica de 4000 m

20 Más precisamente:

- el acoplador 6 está dispuesto de tal manera que si la señal óptica entra dentro del acoplador 6 desde el bucle 7 con la primera dirección de circulación 21, esta señal óptica se reinyecta parcialmente en el bucle 7 con la primera dirección de circulación 21 (normalmente 50%), y se expulsa parcialmente fuera del bucle 7 (normalmente 50%) (pero no se expulsa o casi no se expulsa hacia la salida 13 y/o hacia los medios de análisis 63).
- 25    – el acoplador 6 está dispuesto de tal manera que si la señal óptica entra dentro del acoplador 6 desde el bucle 7 con la segunda dirección de circulación 22, esta señal óptica es expulsada parcialmente fuera del bucle 7 hacia la salida 13 y/o hacia los medios de análisis 63, y se reinyecta parcialmente en el bucle con la segunda dirección 22 de circulación.

30 Cada acoplador de fibra 6 es preferiblemente un acoplador con fusibles de 2x2, por ejemplo, el acoplador de referencia WBC-22-155-50 de la tecnología Accelink con dos puertos 51, respectivamente, de entrada o salida y dos puertos opuestos 52, respectivamente, de salida o entrada. Cuando la luz entra en uno de los puertos 51 o 52, respectivamente, sale por los dos puertos opuestos 52 o 51, respectivamente. Uno de los puertos 52 no se puede utilizar, y normalmente está dirigido a un bloqueador 53 de haz.

35 El acoplador 6 está conectado a la primera entrada 11 (y al primer emisor 61) y está dispuesto de tal manera que, después de ser emitido y recibido por la primera entrada 11, el al menos un pulso óptico 5 entra en el acoplador 6, y se inyecta al menos parcialmente en el bucle 7 con la primera dirección de circulación 21 (pero no se expulsa o casi no se expulsa hacia la salida 13 y/o hacia los medios de análisis 63). Más precisamente, el acoplador 6 está dispuesto de tal manera que, después de ser emitido y/o recibido por la primera entrada 11, el al menos el pulso óptico 5 entra en el acoplador 6 y se inyecta parcialmente en el bucle 7 con la primera dirección de circulación 21, y se expulsa parcialmente fuera del bucle (pero no se expulsa o casi no se expulsa hacia la salida 13 y/o hacia los medios de análisis 63).

40 La figura 1 ilustra la primera realización del dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención. Esta primera realización es la realización de "bucle" más simple y comprende las características descritas anteriormente.

45 El al menos un evento 9 está en el bucle óptico 7.

Esta primera realización no se prefiere, porque la señal retrodispersada pasa varias veces a través del bucle 7. La retrodispersión del primer pulso rodeará el bucle e interactuará con el segundo pulso.

Esto se evita en otras realizaciones utilizando un EDFA 15 (con aislante incorporado) y/o un circulador 4.

50 Se describe ahora, con referencia a la figura 2, la segunda realización de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención. Esta segunda realización se describirá solo por sus diferencias en comparación con

la primera realización de la figura 1.

Esta segunda realización del dispositivo 10 comprende un amplificador óptico 15 en el bucle óptico 7.

Dicho amplificador 15 está dispuesto para amplificar la señal óptica (el al menos un pulso 5) que viaja en el bucle 7 en la primera dirección 21.

5 Dicho amplificador 15 tiene una ganancia igual o menor que una pérdida de ida y vuelta del bucle 7.

El acoplador 6 está ubicado en el bucle 7 después del amplificador 15 y antes del al menos un evento 9, siguiendo la primera dirección 21 de circulación.

El amplificador óptico 15 está dispuesto para compensar la pérdida del acoplador y la pérdida de propagación de la fibra en cada ida y vuelta de la bomba.

10 Un amplificador óptico 15 (preferiblemente un amplificador de fibra dopada con erbio, también llamado EDFA) está ubicado en el bucle 7. La emisión espontánea amplificada (también llamada ASE) del EDFA se filtra utilizando un filtro ASE 16 (normalmente por reflexión de la señal deseada en una rejilla de fibra de Bragg también llamada FBG conectada a un circulador no ilustrado) o con un filtro de película delgada no ilustrado (TFT).

15 Se utiliza un atenuador óptico variable 14 (también llamado VOA) para ajustar la ganancia del EDFA y evitar que el bucle 7 oscile como un láser de fibra anular; alternativamente, la ganancia se puede ajustar modificando la corriente del láser de la bomba EDFA, es decir, sin atenuador 14.

Se describe ahora, con referencia a la figura 3, la tercera realización de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención. Esta tercera realización se describirá solo por sus diferencias en comparación con la primera realización de la figura 1.

20 Esta tercera realización se utiliza para los analizadores ópticos de Brillouin en el dominio del tiempo (también llamados "BOTDA")

En esta tercera realización, el dispositivo 10 comprende además una segunda entrada 12 o conector 12 dispuesto para:

- estar conectado a un segundo emisor 62 dispuesto para emitir una señal de sonda continua 55, y
- 25 ◦ recibir esta señal de sonda continua
- inyectar esta señal de sonda continua hacia la fibra óptica 8.

La señal de sonda 55 es una señal de luz, preferiblemente una señal de luz láser, que normalmente tiene una longitud de onda entre 1530 nm y 1560 nm.

La primera entrada 11 y la segunda entrada 12 están ubicadas en dos ubicaciones diferentes.

30 El dispositivo 10 comprende además medios para inyectar la sonda continua 55 en el bucle 7.

Los medios para inyectar la sonda continua 55 en el bucle 7 comprenden un circulador 4, estando insertado el circulador 4 en el bucle 7 y conectado a la segunda entrada 12 y/o al segundo emisor 62, estando dispuesto el circulador 4 en una forma tal que, después de ser emitida y/o recibida por la segunda entrada 12, la señal de sonda continua 55 entra en el circulador 4, y es al menos parcialmente inyectada en el circuito 7 con la segunda dirección de circulación 22. Más precisamente, el circulador 4 está dispuesto de tal manera que, después de ser emitida y/o recibida por la segunda entrada 12, la señal de sonda continua 55 entra en el circulador 4, y se inyecta (preferiblemente en su totalidad o casi en su totalidad) en el circuito 7 con la segunda dirección de circulación 22.

35 En esta descripción, cada circulador óptico 4, 40, 41, 42, 43 es un componente de fibra óptica y es un dispositivo de al menos tres puertos (preferiblemente un dispositivo de tres o cuatro puertos) diseñado de manera que la luz que entra en cualquier puerto sale por el siguiente. Preferiblemente, en esta descripción, cada circulador óptico 4, 40, 41, 42, 43 es un dispositivo de tres puertos que comprende tres puertos referenciados 1, 2 y 3, respectivamente, y dispuestos de tal manera que la luz solo puede pasar del puerto 1 al puerto 2 y del puerto 2 al puerto 3 (excepto para el circulador 40 "especial", que permite también del puerto 3 al puerto 1).

Cada circulador 4, 40, 41, 42, 43 es, por ejemplo, un circulador referenciado como CIR-3-155 de la tecnología Accelink.

45 El circulador 4 permite que la sonda 55 entre en el circuito 7 (del puerto 1 al puerto 2) y realice solo un viaje de ida y vuelta (el puerto 3 es solo una salida). La bomba 5 se desplaza en la otra dirección 21 y rodea el bucle 7 utilizando la trayectoria del puerto 2 al puerto 3. La fibra de retorno 54 (con una longitud típica de 50 km) no es obligatoria y la razón de acoplamiento del acoplador 6 se ha establecido arbitrariamente en 50/50.

El acoplador 6 está ubicado en el bucle 7 después del circulador 4 y antes del al menos un evento 9, siguiendo la

primera dirección 21 de circulación.

La única dirección de circulación posible a través del circulador 4 en el circuito 7 es la primera dirección 21 de circulación, y no la segunda dirección 22 de circulación.

5 Los medios para inyectar la sonda continua 55 en el bucle 7 están dispuestos para inyectar al menos parcialmente la sonda continua 55 en el bucle 7 con la segunda dirección 22 de circulación.

El dispositivo 10 comprende además medios para evitar que una señal óptica realice dos o más vueltas en el bucle 7 a través del al menos un evento 9 siguiendo la segunda dirección de circulación 22 (estos medios comprenden el circulador 4 en el bucle 7).

10 La información de frecuencia de la luz retrodispersada de Brillouin (posición de la longitud de onda/frecuencia con respecto a la luz láser original) se puede aprovechar para medir la temperatura local o la información de deformación a lo largo de la fibra óptica 8. La técnica se denomina técnica basada en la frecuencia, ya que la temperatura o la información de deformación están contenidas en el desplazamiento de frecuencia de Brillouin.

15 El proceso de dispersión de Brillouin tiene la particularidad de que puede ser estimulado por una segunda señal óptica además de la onda luminosa 5 que genera la dispersión, siempre que esta segunda señal, denominada sonda 55, cumpla unas condiciones específicas. Esta es una propiedad especialmente interesante para la aplicación de detección y se puede lograr mediante el uso de un haz de sonda 55 que se propaga con respecto a la bomba 5. La estimulación se maximiza cuando las frecuencias de la bomba y la sonda (o longitudes de onda) están exactamente separadas por el desplazamiento de Brillouin. En este caso, la energía transferida desde la bomba 5 a la sonda 55 muestra una intensidad de retrodispersión muy mejorada y, por lo tanto, una mayor razón señal/ruido (también denominada SNR). Esto se ve como un fenómeno resonante en el que se produce una amplificación de la potencia de la sonda a expensas de la bomba cuando se cumple la condición resonante, es decir, cuando la diferencia de frecuencia entre la bomba 5 y la sonda 55 coincide con la frecuencia local de Brillouin. En otras palabras, el proceso de dispersión es estimulado por la inyección de la señal de sonda 55.

25 El escaneo de la frecuencia de la sonda con respecto a la bomba mientras se supervisa la intensidad de la señal retrodispersada permite encontrar el pico de ganancia de Brillouin y, por lo tanto, el desplazamiento de Brillouin correspondiente, a partir del cual se puede calcular la temperatura o la deformación [5].

30 El proceso de estimulación se puede lograr utilizando un solo láser a partir del cual se crean tanto el haz de bombeo 5 (pulso óptico de unos pocos nanosegundos de longitud) como el haz de sonda 55 (onda continua - luz CW). Se utiliza un modulador óptico similar al de las telecomunicaciones para escanear la frecuencia de la sonda de manera controlada. Este haz de sonda 55 se envía al final de la región de detección utilizando una segunda fibra óptica.

Debido a la naturaleza pulsada de la bomba 5, la interacción bomba/sonda tiene lugar en diferentes lugares a lo largo de la fibra en diferentes momentos. Para cualquier ubicación dada ( $t_1$ ), la parte de la señal de sonda 55 que interactuó con la bomba 5 llega al detector 63 después de un retardo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la entrada de fibra a la ubicación especificada.

35 Por tanto, la supervisión de la intensidad de la retrodispersión con respecto al tiempo, mientras se conoce la velocidad de la luz en la fibra 8, proporciona información sobre la posición en la que tuvo lugar la dispersión.

La combinación del análisis en el dominio del tiempo junto con el análisis de frecuencia proporciona la distribución de temperatura o deformación a lo largo de la fibra óptica [4].

40 Los instrumentos 101 basados en la retrodispersión de Brillouin estimulada (SBS) se conocen como analizadores ópticos de Brillouin en el dominio del tiempo o (BOTDA), también conocidos como instrumentación de doble extremo, a diferencia de los "reflectómetros ópticos de Brillouin en el dominio del tiempo" (también llamados BOTDR) que están basados en la retrodispersión espontánea de Brillouin (conocida como de un solo extremo) y no utilice un haz de sonda 55.

45 Se describe ahora, con referencia a la figura 4, la cuarta realización de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención. Esta cuarta realización es la combinación de:

- la segunda realización de la figura 2, y
- la tercera realización de la figura 3,

y, por tanto, comprende las características ya descritas anteriormente.

50 Además, en esta cuarta realización, el amplificador 15 está ubicado en el bucle 7 después del circulador 4 y antes del acoplador 6, siguiendo la primera dirección 21 de circulación.

El amplificador óptico 15 (preferiblemente un amplificador de fibra dopada con erbio, también llamado EDFA) está ubicado entre el puerto 3 del circulador y el acoplador 6, de modo que no se proporcione ganancia a la sonda 55.

Se describe ahora, con referencia a la figura 11, la quinta realización de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención. Esta quinta realización se describirá únicamente por sus diferencias en comparación con la cuarta realización de la figura 4.

5 En esta quinta realización, los medios para inyectar la sonda continua 55 en el bucle 7 no comprenden el circulador 4, sino que comprenden el acoplador 6.

Además, los medios para evitar que cualquier señal óptica (la sonda 55) realice dos o más vueltas en el bucle 7 a través del al menos un evento 9 siguiendo la segunda dirección 22 de circulación comprenden:

- una placa 17 de semi-onda en el bucle 7,
- un rotador de Faraday 18 en el bucle 7,
- 10 – un primer polarizador 19 entre la entrada 11 y el acoplador 6 o el bucle 7,
- un segundo polarizador 20 entre la entrada 12 y el acoplador 6 o el bucle 7, teniendo el primer y segundo polarizadores 19, 20 dos direcciones de polarización ortogonales,
- otro polarizador 23 en el bucle 7.

15 La realización de la Figura 11 gestiona la recirculación de la sonda 55 basándose en la manipulación del estado de polarización (también llamado SOP) de las señales implicadas. En particular, aprovecha la naturaleza de contrapropagación de la bomba 5 y la sonda 55 haciendo uso de una combinación de un dispositivo recíproco, es decir, la placa 17 de semi-onda y un dispositivo no recíproco, es decir, el rotador de Faraday 18 (también llamado FR).

La polarización de la señal de bomba 5 se alinea primero con uno de los ejes de la fibra 8a de mantenimiento de polarización (también llamada fibra PM) antes de acoplarse al bucle 7 (aquí polarización vertical).

20 De manera similar, la polarización de la señal de sonda 55 está alineada ortogonalmente a la de la bomba (es decir, horizontalmente).

Los polarizadores 19, 20 correctamente alineados garantizan un SOP limpio en la entrada del bucle.

25 Debido a su dirección de propagación, la bomba 5 recuperará su SOP original después de su viaje a través de la placa 17 de semi-onda y el rotador de Faraday 18. Estos dispositivos están diseñados de hecho de manera que sus contribuciones se cancelan entre sí para la señal de la bomba 5. El rotador de Faraday 18 siempre induce una rotación de + 45° a una polarización lineal en su entrada, mientras que la placa 17 de semi-onda gira una polarización lineal en -45° para una señal que viaja en la dirección 21 de la bomba y en + 45° para una señal que viaja en la dirección 22 de la sonda 55. Como consecuencia, cuando la sonda 55 se acopla al bucle 7, la acción de la placa 17 de semi-onda y el rotador 18 hacen que su SOP cambie de "horizontal" a "vertical", lo que permite que la sonda 55 pase de forma segura a través del polarizador "vertical" 23 e interactúe con la señal de la bomba 5. Después de su primer viaje a través del bucle 7, la placa 17 de semi-onda y el rotador 18 vuelven a girar el SOP lineal de la sonda 55 por 90°, de modo que esta última recupere un SOP "horizontal" que es detenido por el polarizador 23, evitando así que la sonda recircule.

35 Para lograr esto, la luz en la entrada de la placa 17 de semi-onda debe estar acoplada con un ángulo de 22,5° con respecto a sus ejes ópticos. Esto se puede demostrar haciendo uso de matrices de Jones. Consideremos las matrices correspondientes a la placa 17 de semi-onda  $J_{\lambda/2}$  y el rotador de Faraday 18 JFR. Se supone que el eje rápido de la placa 17 de semi-onda forma un ángulo de 22,5° con respecto a una polarización horizontal de entrada.

$$J_{\lambda/2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad J_{FR} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

40 Se considera que la bomba 5  $V_{\theta}^{bomba}$  está polarizada verticalmente. En primer lugar, pasa por el rotador 18 antes de entrar en la placa 17 de semi-onda. El SOP de salida de la bomba  $V_{sal}$  es por tanto igual a:

$$\begin{aligned} V_{sal}^{bomba} &= J_{\lambda/2} J_{FR} V_{\theta}^{bomba} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \\ &= e^{-i\pi} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

que también es vertical a pesar de estar afectada por un desplazamiento de fase  $\pi$ . Se puede verificar fácilmente que una polarización de entrada horizontal da como resultado una polarización de salida horizontal.

La sonda 55 entra en primer lugar en la placa 17 de semi-onda antes de pasar por el rotador 18. Debido a las

propiedades de estos dispositivos, sus matrices de Jones permanecen sin cambios cuando se considera una inversión en la dirección de propagación. Si la sonda 55  $V_{\theta}^{sonda}$  también está polarizada verticalmente, saldrá de los elementos concatenados con el siguiente SOP:

$$V_{sal}^{sonda} = J_{FR} J_{\lambda/2} V_{\theta}^{sonda} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

5 que corresponde a una polarización horizontal. Se puede comprobar fácilmente que una polarización de entrada vertical da como resultado una polarización de salida horizontal. Parece claramente que la señal 5 de la bomba siempre mantiene su estado de polarización mientras que la polarización de la señal de la sonda experimenta una rotación de 90° después de su viaje a través del rotador de Faraday 18 y la placa 17 de semi-onda.

10 Una de las ventajas del uso de fibras PM es que la ganancia de Brillouin se mejora (en realidad se maximiza) cuando las señales de contrapropagación están polarizadas linealmente a lo largo del mismo eje. Es de particular interés aquí, ya que uno está interesado en detectar el mayor número de eventos 9. Por lo tanto, un nivel de interacción más alto aumentará la razón señal/ruido (SNR) y mejorará la repetibilidad de las mediciones. Es posible utilizar una placa 17 de semi-onda con fibras o una interfaz de fibra a espacio libre para insertar la placa 17 de semi-onda en el bucle 7. La placa 17 de semi-onda con fibras se puede fabricar manipulando fibras PM.

15 Se describe ahora, con referencia a la figura 12, la sexta realización de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención. Esta sexta realización se describirá solo por sus diferencias en comparación con la quinta realización de la figura 11.

La funcionalidad obtenida usando la configuración descrita en la figura 11 se puede implementar de manera equivalente usando la configuración ilustrada en la figura 12.

20 El rotador de Faraday 18 y la placa 17 de semi-onda están siendo reemplazados por un espejo 24 de Faraday y un circulador 40 "especial".

25 De hecho, todos los puertos de este circulador 40 deben funcionar como entradas, de modo que una señal entrante en el puerto 3 sea redirigida hacia el puerto 1. Como resultado del mecanismo que se explota para fabricarlos, los circuladores ópticos normalmente no exhiben tal comportamiento. Por lo tanto, esta configuración requiere adquirir un circulador 40 personalizado o recuperar la funcionalidad deseada haciendo uso de tres circuladores convencionales en un esquema triangular (Figura 17). La última opción obviamente reduce el rendimiento del sistema como consecuencia de las altas pérdidas de inserción.

30 Se describe ahora, con referencia a la figura 13, la séptima realización de un dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención. Esta séptima realización se describirá solo por sus diferencias en comparación con la cuarta realización de la figura 4.

En esta séptima realización, el al menos un evento 9 está fuera del bucle óptico 7.

El dispositivo 10 está dispuesto para no inyectar la sonda continua 55 en el bucle 7. En otras palabras, el dispositivo 10 no comprende ningún medio para inyectar la sonda continua 55 en el bucle 7, de modo que la sonda continua 55 no puede dirigirse al bucle 7.

35 El dispositivo 10 comprende dos circuladores 41, 42 fuera del bucle 7 y en dos lados diferentes del acoplador 6:

– un circulador 41 entre:

- la entrada 11 y
- el acoplador 6 y/o el bucle 7,

– un circulador 42 entre:

- 40
- la entrada 12 y/o el al menos un evento 9 y
  - el acoplador 6 y/o el bucle 7.

Cada circulador 41, 42, respectivamente, tiene tres puertos:

- un puerto 2 conectado (a través de una fibra óptica) a la entrada 11 o 12, respectivamente
- un puerto 1 o 3, respectivamente, conectado (a través de una fibra óptica) al otro circulador 42 o 41

45

- un puerto 3 o 1, respectivamente, conectado (a través de una fibra óptica) al acoplador 6.

5 Es posible disociar localmente las trayectorias tomadas por la sonda 55 y la bomba 5 haciendo uso de los dos circuladores 41, 42 como se muestra en la Figura 13. En esta configuración, solo la señal de la bomba pulsada 5 pasa varias veces a través del bucle 7 mientras que la señal de sonda 55 CW viaja directamente hacia el sensor 63. En comparación con la configuración que usa un solo circulador (Figura 4), esta configuración ofrece la ventaja de una mayor amplitud de la sonda, ya que la última no pasará por el acoplador 6, lo que probablemente tenga una razón de acoplamiento normalmente de 50:50.

10 Sin embargo, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones con respecto a los diferentes tiempos de vuelo involucrados, en particular el hecho de que solo el pulso 5 está siendo retrasado por el bucle 7, de manera que la señal de bomba 5 y la señal de sonda 55 viajan por trayectorias diferentes. Como el aparato 101 ensayado calcula la distancia desde un tiempo igual al tiempo requerido para alcanzar el evento 9 desde el sensor, será necesario procesar posteriormente la información de distancia proporcionada por el aparato 101.

Se describen ahora las características comunes de las realizaciones "sin bucle" de las figuras 14 a 15 que implementan un proceso de calibración según la invención.

En estas realizaciones, el dispositivo 10 comprende:

- 15
- una segunda entrada 12 dispuesta para:
    - estar conectada a un segundo emisor 62 dispuesto para emitir una señal de sonda continua 55, y
    - recibir esta señal de sonda continua 55,
    - inyectar esta señal de sonda continua 55 hacia la fibra óptica 8.

La primera entrada 11 y la segunda entrada 12 están ubicadas en dos ubicaciones diferentes.

20 La figura 14 ilustra la octava realización del dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.

En esta realización, los medios para crear diferentes trayectorias ópticas comprenden una cavidad dispuesta para hacer que la al menos una señal de pulso óptico 5 viaje hacia delante y hacia atrás en la cavidad.

El al menos un evento 9 está en la cavidad.

25 La cavidad está delimitada por dos rejillas de fibra de Bragg 25, 27.

El dispositivo 10 comprende medios dispuestos para conducir la sonda 55 al interior de la cavidad, pero el dispositivo 10 está dispuesto de modo que la sonda 55 no pueda desplazarse hacia delante y hacia atrás en la cavidad.

Un circulador 43 comprende tres puertos:

- 30
- un puerto 1 vinculado a un extremo 27 de la cavidad (rejilla 27)
  - un puerto 2 vinculado a la entrada 11
  - un puerto 3 vinculado a un acoplador 26.

El otro extremo 25 de la cavidad (la otra rejilla 25) está conectado a la entrada 12.

El al menos un evento 9 está ubicado entre el otro extremo 25 de la cavidad (la otra rejilla 25) y el acoplador 26.

35 Solo cada bomba 5 se desplaza hacia delante y hacia atrás en la cavidad. La sonda 55 pasa por el FBG 25, 27. La sonda 55 va después al puerto 1 del circulador y se envía al puerto 2 del circulador.

El acoplador 26 está dentro de la cavidad.

40 Dado que la bomba 5 y la sonda 55 están desplazadas aproximadamente 11 GHz en frecuencia, teóricamente sería posible realizar una operación de separación mediante filtrado clásico. Aunque la configuración representada en la Figura 14 no exhibe una arquitectura de bucle, se comporta de alguna manera de manera idéntica ya que la cavidad formada por las dos rejillas de Bragg de fibra (FBG) 25, 27 hace, en su presencia, que la bomba 5 se desplace hacia delante y hacia atrás. Dado que no se produce interacción cuando la bomba 5 y la sonda 55 se propagan conjuntamente, se detecta una detección de evento después de cada recorrido de ida y vuelta de un pulso 5 en la cavidad. Desafortunadamente, este concepto no es perfecto para la "Dispersión de Brillouin estimulada" (también llamada SBS), ya que las señales tienen una frecuencia muy cercana desde un punto de vista óptico, y es difícil para las FBG clásicas lograr una separación completa de las bandas laterales y la frecuencia central del láser. Además, la presencia de las dos bandas laterales requiere preferiblemente el uso de un filtro de paso de banda muy estrecho. Dicha arquitectura es de interés para otros procesos como, por ejemplo, la "dispersión Raman estimulada" (también llamada SRS), que comparten algunas propiedades comunes con SBS, siendo una diferencia importante la frecuencia

45

inducida por la interacción que se encuentra en el intervalo de terahercios.

La figura 15 ilustra la novena realización del dispositivo 10 que implementa un proceso de calibración según la invención.

En esta realización, los medios para crear diferentes trayectorias ópticas comprenden:

- 5
- un conmutador óptico 28 dispuesto para seleccionar una trayectoria óptica entre las diferentes trayectorias ópticas, y
  - acopladores respectivamente 29, 30, ... que unen todas las diferentes trayectorias ópticas, comprendiendo cada trayectoria una línea de retardo fibrada, respectivamente 290, 300, ....

El al menos un evento 9 está entre la entrada 12 y el interruptor 28.

10 A diferencia de otras configuraciones presentadas anteriormente, esta realización evita el uso de un bucle 7 cuando se aborda el problema de detectar el mismo evento 9 en múltiples distancias. En su lugar se utilizan el interruptor óptico 28 y varias líneas de retardo 290, 300, .... En la Figura 15 se muestra una posible implementación. También requiere el uso de varios acopladores 29, 30, ... El principio de funcionamiento de dicha configuración es mucho más simple e intuitivo que los anteriores.

15 En cada realización del dispositivo 10, el al menos un evento 9 puede comprender (como se ilustra en la figura 8) una pluralidad de eventos 9, que comprenden segmentos de fibra de un segundo tipo de fibra 92, teniendo los segmentos (respectivamente 921, 922, 923, 924, 925) del segundo tipo 92 diferentes longitudes, preferiblemente una longitud creciente.

20 La fibra 8 también comprende segmentos de fibra de un primer tipo de fibra 91, que preferiblemente no es el mismo tipo de fibra que todas las demás partes de la fibra 8 (8a, etc.) que no son eventos 9; esto limita los efectos parasitarios.

Los segmentos de fibra de los dos tipos diferentes de fibras 91, 92 están colocados alternativamente.

Cada segmento 92 (entre todos los segmentos 92 o entre al menos una pluralidad de los segmentos 92, pero no necesariamente todos los segmentos 92 como se ilustra en la figura 8) es preferiblemente al menos un 33% más corto que cada segmento circundante 91 al que está conectado.

25 Como se ha visto anteriormente:

- La dispersión de Rayleigh es la interacción de un pulso de luz 5 con impurezas materiales; También se puede utilizar para medir la temperatura y la deformación.
- La dispersión de Brillouin es la interacción de un pulso de luz 5 con ondas acústicas excitadas térmicamente. El desplazamiento de frecuencia de Brillouin depende de la temperatura y la deformación.
- 30 - La dispersión Raman es la interacción de un pulso de luz 5 con vibraciones moleculares excitadas térmicamente. La intensidad del componente Raman Anti-Stokes depende de la temperatura, mientras que el componente de Stokes es casi insensible a la temperatura, por lo que es posible la medición de la temperatura.

Se conocen tecnologías de detección de distribución para medir una temperatura, una deformación, una posición, una presión, una vibración y/o propiedades de birrefringencia en una fibra óptica.

35 Las tecnologías de detección de distribución también tienen una resolución espacial específica.

Todas esas propiedades de un aparato de detección de distribución 101 necesitan a veces ser calibradas o verificadas.

Por tanto, ahora se van a describir realizaciones de un proceso implementado por las realizaciones anteriores de un dispositivo 10.

40 Cada una de estas realizaciones de un proceso según la invención para calibrar el aparato 101 de tecnología de detección de distribución comprende las siguientes etapas:

- el emisor 61 del aparato 101 está conectado a la primera entrada 11 y emite el al menos un pulso óptico 5,
- los medios de análisis 63 del aparato 11 están conectados a la salida 13 y analizan la señal retrodispersada generada por el al menos un evento 9 en la fibra óptica, y
- 45 - opcionalmente, en los casos específicos que utilizan una sonda 55 (véanse, por ejemplo, las figuras 3, 4 y 11 a 15), el emisor 62 del aparato 101 está conectado a la segunda entrada 12 y emite la sonda 55.

Después, se pueden implementar dos opciones, que se pueden combinar entre sí.

En la primera opción, el análisis de la señal retrodispersada da un valor medido de una información relativa a al menos un evento 9.

Normalmente, esta primera opción comprende la etapa de calibrar (por ejemplo, comparar el valor medido con un valor de referencia de la información).

- 5 Si la diferencia entre el valor medido y el valor de referencia está por encima de un valor umbral, comprende la etapa de ajustar (o corregir una calibración de) los medios de análisis 63 usados para medir el valor medido.

La información normalmente es:

- una posición, una temperatura, una deformación, una presión, una vibración acústica y/o propiedades de birrefringencia del evento 9 o de uno de los eventos 9, y/o
- 10
- una amplitud y/o una frecuencia de la señal retrodispersada correspondiente a este evento 9, y/o
  - una distancia espacial entre dos eventos 9 diferentes o una diferencia de longitud entre dos de las diferentes trayectorias ópticas que pasan por el mismo evento 9.

En la segunda opción, el análisis de la señal retrodispersada mide una resolución espacial para detectar el al menos un evento 9.

- 15 La resolución espacial se calcula normalmente a partir de una anchura espacial de una pendiente 31 de una señal retrodispersada correspondiente a un evento 9.

En un ejemplo ilustrado en la figura 8, el al menos un evento 9 comprende una pluralidad de eventos 9, que comprenden segmentos de fibra de un segundo tipo de fibra 92, teniendo los segmentos (respectivamente 921, 922, 923, 924, 925) del segundo tipo 92 diferentes longitudes, preferiblemente una longitud creciente a lo largo del bucle 7.

- 20 La fibra 8 también comprende segmentos de fibra de un primer tipo de fibra 91, que preferiblemente no es el mismo tipo de fibra que todas las demás partes de la fibra 8 (8a, etc.) que no son eventos 9.

Los segmentos de fibra de dos tipos diferentes de fibras 91, 92 se colocan alternativamente.

- 25 Cada segmento 92 (entre todos los segmentos 92 o entre al menos una pluralidad de los segmentos 92, pero no necesariamente todos los segmentos 92 como se ilustra en la figura 8) es preferiblemente al menos un 33% más corto que cada segmento circundante 91 al que está conectado.

La resolución espacial se mide a partir de las amplitudes de diferentes señales retrodispersadas correspondientes a los diferentes segmentos del segundo tipo de fibra 92. Normalmente, la resolución espacial se mide a partir de:

- las amplitudes de diferentes señales de retrodispersión Raman correspondientes a los diferentes segmentos del segundo tipo de fibra 92, y/o
- 30
- las frecuencias de Brillouin de diferentes señales retrodispersadas correspondientes a los diferentes segmentos del segundo tipo de fibra 92, y/o
  - las frecuencias de Rayleigh de diferentes señales retrodispersadas y/o las amplitudes de diferentes señales retrodispersadas de Rayleigh, correspondientes a los diferentes segmentos del segundo tipo de fibra 92,

- 35 Se describe ahora un ejemplo más específico de proceso según la invención, implementado para BOTDA (por ejemplo, por el dispositivo 10 de la figura 3 o 4), en referencia a las figuras 5 a 6.

- La respuesta de frecuencia de Brillouin de una fibra depende de su tipo y proceso de fabricación. Combinando, por ejemplo, dos fibras diferentes a (para el bucle 7 pero no el al menos un evento 9, 92) y b (para al menos un evento 9, 92) con frecuencias de Brillouin  $\nu_a$  y  $\nu_b$ , como se ilustra en la figura 5, de modo que el bucle de recirculación tenga la frecuencia de Brillouin  $\nu_a$  y cada evento tiene la frecuencia de Brillouin  $\nu_b$  de longitud  $dL$ , se define un evento que se puede utilizar para la resolución espacial (la longitud  $dL$ ), la distancia (el espaciado del evento debido al viaje de ida y vuelta de múltiples bombas) y la frecuencia de Brillouin.
- 40

Téngase en cuenta que si se va a utilizar como sistema de calibración de frecuencia Brillouin, el evento 9 debe estar estabilizado en temperatura y libre de cualquier tensión.

- 45 En aras de la discusión, consideremos el evento 9 a una distancia de 0 km en el circuito 7. Durante la primera interacción, el evento de retrodispersión se ve tan pronto como la bomba 5 entra en el circuito 7 y, por lo tanto, se encuentra a una distancia de 0 km. La bomba 5 recorre entonces la longitud total del circuito antes de alcanzar el evento 9 por segunda vez. Pero nuevamente el evento de retrodispersión va directamente al sistema de detección y no se propaga dentro del bucle 7. El sistema está diseñado para que la retrodispersión viaje tanto como la bomba 5 antes de ser medida. Como este no es el caso aquí, las distancias están separadas por la mitad del tiempo de

propagación de la bomba en el bucle 7, es decir, por la mitad de la longitud del bucle.

El evento 9 puede ser un poco más complejo que una simple longitud de fibra con frecuencia  $\nu_b$ ; este puede ser una serie de diferentes longitudes de fibra 92 con frecuencia  $\nu_b$  separadas por la fibra de bucle regular 91 de modo que se pueda ensayar una resolución espacial diferente.

- 5 También es posible diseñar un evento 9 largo en el que una sección esté bajo tensión controlada o temperatura controlada, etc., de modo que la frecuencia de Brillouin sea desplazada por la tensión o la temperatura. Esto proporciona un medio para validar el rendimiento del instrumento.

- 10 La razón de acoplamiento del bucle 7 se puede optimizar, especialmente cuando no se añade EDFA al bucle 7 y cuando la potencia de la bomba se puede sintonizar fácilmente. En este caso, inicialmente se acopla menos del 50% en el bucle (esto se puede compensar aumentando la potencia de la bomba), pero luego más del 50% permanece en el bucle 7 en cada viaje de ida y vuelta. El valor óptimo depende de la pérdida del circulador y del empalme y normalmente es de aproximadamente un 70%.

El esquema funciona para otros sistemas estimulados por Brillouin como el análisis óptico de Brillouin en el dominio de la frecuencia y las rejillas de Brillouin dinámicas.

- 15 Se describe ahora otro ejemplo más específico de proceso según la invención, implementado para BOTDA (por ejemplo, por el dispositivo 10 de la figura 3 o 4), que se puede combinar con el ejemplo anterior.

- 20 El bucle 7 comprende segmentos de fibra 91, 92 de diferentes longitudes que se empalman entre sí, como se ilustra en la figura 8 (la longitud de cada segmento 91, 92 se indica en la curva que rodea los segmentos 91, 92; la unidad es el metro). Estos segmentos 91, 92 se tomaron de dos bobinas de fibra supuestamente idénticas (mismo modelo y fabricante). Sus curvas de ganancia de Brillouin son muy similares y tienen un desplazamiento de 11 MHz entre sí, como se muestra en la Figura 7. De esta manera, los efectos perjudiciales como el agotamiento de la bomba afectarán a las dos curvas de ganancia de manera similar, evitando una configuración en la que parte de un evento se ve afectado por fenómenos parasitarios mientras que el otro no.

- 25 Por tanto, el bucle 7 comprende múltiples eventos 9 correspondientes a los múltiples segmentos 92 de diferentes longitudes.

Los eventos 9 están destinados a proporcionar una validación de la resolución espacial del instrumento a 1, 2 y 3 metros.

- 30 La resolución espacial es una medición de la capacidad del instrumento para detectar eventos de longitud finita. Aunque existen múltiples definiciones de resolución espacial, aquí se decidió hacer uso de la dada por SEAFOM (por las siglas en inglés de *Subsea Fiber Optic Monitoring Group*) en una guía publicada en marzo de 2010 [6] que se aplica a DTS. Dado un evento (es decir, un cambio de temperatura) cuya longitud es igual a la resolución espacial del instrumento 101, el dispositivo debe poder detectar el cambio dentro de un intervalo de tolerancia especificado (90% -100%). Cualquier evento 9 más corto que la resolución espacial debe caer fuera de estos límites, mientras que un evento 9 mucho más largo se detectará integralmente (menos la resolución espacial).

- 35 Para BOTDA, tal criterio podría no satisfacerse en caso de una distancia de muestreo inadecuada a una razón de resolución espacial. Considérese un evento 9 cuya longitud es igual a la resolución espacial del instrumento y un intervalo de muestreo que es igual a la mitad de la resolución espacial. El evento 9 puede detectarse completamente si una de las muestras se adquiere en un momento correspondiente a una superposición entre el pulso 5 y el evento 9 (el mejor de los casos). El otro caso extremo (el peor de los casos) ocurre para los tiempos de muestreo correspondientes al 25% y 75% de la superposición del pulso 5 y el evento 9. En el peor de los casos, el evento 9 solo se detectará hasta el 75% de su valor.

Se realizaron mediciones a 1 m, 2 m y 3 m de resoluciones espaciales en un aparato 101 correspondiente a DITEST-Vision de Omnisens (Figuras 9 y 10). Cada medición de las figuras 9 y 10 que se muestran aquí es el resultado de un promedio realizado en diez trazas repetidas.

- 45 En las figuras 9 y 10, cada pico o etapa, respectivamente 821, 822, 823, 824, 825, representa una señal retrodispersada correspondiente al evento, respectivamente 921, 922, 923, 924, 925, que tiene una longitud de 0,5, 1, 2, 3, 20 metros, respectivamente.

En estas figuras 9, 10 se muestra el intervalo tolerable 32, 33 según lo definido por SEAFOM junto con la pendiente 31 o el ajuste lineal realizado en el flanco ascendente del evento más largo.

- 50 Al analizar, en la figura 9, la altura del pico 821 que representa una señal retrodispersada correspondiente al evento 921 que tiene una longitud de 0,5 metros, el proceso deduce que no se consigue una resolución espacial de 0,5 metros.

Al analizar, en la figura 9, la altura del pico 822 que representa una señal retrodispersada correspondiente al evento

922 que tiene una longitud de 1 metro, el proceso deduce que se logra una resolución espacial de 1 metro.

Al analizar, en la figura 10, la anchura de la pendiente 31 de la etapa 825 que representa una señal retrodispersada correspondiente al evento 925, el proceso deduce el valor de la resolución espacial del aparato 101 ensayado (aproximadamente igual a 1 metro).

- 5 El proceso de calibración descrito anteriormente (en particular para BOTDA) también se puede adaptar al Analizador Óptico de Brillouin en el Dominio de la Frecuencia (BOFDA).

Se pueden implementar otras realizaciones de un proceso de calibración según la invención:

- en el dispositivo 10 de la figura 1 o 2, o
- en el dispositivo 10 de cualquiera de las figuras 3, 4, 11, 12, 13, 14 o 15, sin emitir la sonda 55 y modificando este dispositivo 10 suprimiendo el emisor 62 y/o cualquier parte del dispositivo específicamente dedicada a la circulación de la sonda 55,

en particular:

- para el reflectómetro óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (también llamado BOTDR) o el reflectómetro óptica de Brillouin en el dominio de la frecuencia (BOFDR). BOTDR funciona de manera similar a BOTDA tanto para la medición del tiempo de vuelo como para el análisis de frecuencia. La diferencia es la ausencia de estimulación por la sonda 55.
- para retrodispersión Raman, en particular para "detección de temperatura distribuida" (DTS). La retrodispersión Raman se utiliza para medir la temperatura. La medición del tiempo de vuelo es similar a la de BOTDR. La propia señal Raman corresponde a la intensidad de las líneas retrodispersadas. La calibración de la distancia y la calibración de la resolución espacial vienen dadas por la longitud del bucle y la duración del evento. La calibración de temperatura se logra aplicando sucesivamente dos temperaturas conocidas y controladas (o solo una temperatura conocida y controlada, con alguna hipótesis teórica sobre las fibras utilizadas) en el primer evento medido y comprobando que todos los eventos posteriores se miden correctamente. El artefacto para Raman DTS puede estar basado en fibra monomodo o multimodo, según el tipo de instrumento.
- para la retrodispersión de Rayleigh, en particular para:
  - "Detección acústica distribuida" (también llamada DAS). El circuito de recirculación 7 es similar a de BOTDR. Aquí también se puede considerar la compensación de la pérdida dentro del bucle 7. El evento 9 puede ser una sección de fibra que se hace vibrar activamente, por ejemplo, utilizando un actuador piezoeléctrico. La resolución espacial se puede definir por la distancia entre dos de tales actuadores adyacentes dentro del bucle 7. Los dos eventos 9 deben identificarse independientemente para demostrar que están espaciados por la resolución espacial.
  - "Detección de temperatura distribuida" (DTS) y "Detección de deformación distribuida" (DSS). La retrodispersión de Rayleigh se puede utilizar para medir la temperatura o el efecto de deformación a lo largo de una fibra de forma similar a un sistema basado en Brillouin. Esto se logra escaneando la longitud de onda del láser y trabajando en la autocorrelación de dos escaneos sucesivos del espectro de Rayleigh. Como DTS y DSS basados en Rayleigh no son sistemas estimulados, el circuito de recirculación es similar al caso de BOTDR. La ganancia es aplicable.

La retrodispersión de Rayleigh y Brillouin se puede utilizar para medir la presión distribuida (DPS) por medio de un mecanismo de conversión de presión a deformación. Esto se puede aplicar en el evento para la calibración de DPS.

- 40 Del mismo modo, la llamada Rejilla Dinámica de Brillouin se puede usar para DPS con un evento similar.

La medición de birrefringencia, relacionada con DPS en algunos casos, también se puede utilizar para un evento de referencia.

Para la retrodispersión Rayleigh o Brillouin, todas las fibras ópticas de cualquier realización del dispositivo 10 son preferiblemente fibras monomodo.

- 45 Para la retrodispersión Raman, todas las fibras ópticas de cualquier realización del dispositivo 10 son preferiblemente fibras multimodo.

- 50 Para la retrodispersión de Brillouin, la longitud de onda de cada señal de pulso 5 y/o de la señal de sonda 55 está normalmente entre 1530 nm y 1560 nm, pero cuando se considera Raman, podría ser tan baja como 1060 nm. Entonces, de manera general, la longitud de onda de cada señal de pulso 5 y/o de la señal de sonda 55 está normalmente entre 1000 nm y 1600 nm.

En el dispositivo 10 anterior y las realizaciones del proceso, se prefiere una trazabilidad metrológica completa del

artefacto a los estándares nacionales correspondientes para hacer del artefacto una verdadera referencia para la calibración de sistemas de detección distribuidos.

La longitud del bucle 7 se puede medir utilizando un OTDR calibrado o utilizando métodos de tiempo de vuelo rastreables o interferométricos.

5 La duración y la ubicación de cada evento 9 se pueden medir utilizando técnicas similares.

Para el sistema de Brillouin y para Rayleigh cuando se usa para mediciones de temperatura y deformación, es decir, para sistemas que requieren un desplazamiento de frecuencia controlado, es posible usar una señal latente en el dominio eléctrico y un contador de frecuencia rastreable para calibrar el desplazamiento de frecuencia en función de la temperatura de referencia.

10 Cuando la temperatura, la deformación, la presión, la vibración, la birrefringencia u otros efectos se utilizan como evento, preferiblemente se calibran frente a sistemas de referencia.

Por supuesto, la invención no se limita a los ejemplos que se acaban de describir y se pueden hacer numerosas modificaciones a estos ejemplos sin exceder el alcance de la invención.

Por ejemplo:

15 – en variantes de las realizaciones descritas anteriormente, el acoplador 6 puede ser reemplazado por un conmutador óptico sincronizado y/o un conjunto de diferentes polarizadores.

Por supuesto, las diferentes características, formas, variantes y realizaciones de la invención pueden combinarse entre sí en diversas combinaciones en la medida en que no sean incompatibles o mutuamente excluyentes. En particular, todas las variantes y realizaciones descritas anteriormente se pueden combinar entre sí.

20 Referencias citadas:

[1] Culshaw B. (2004). Optical fiber sensor technologies: opportunities and, perhaps, pitfalls. *Journal of Lightwave Technology*, 22, pág. 39-50.

[2] Derickson D. (1998). *Fiber Optic Tests and Measurements*. Prentice Hall.

25 [3] Kersey A. D. (1996). A review of recent developments in fiber optic sensing technology. *Optical Fiber Technology*, 2, pág. 291-317.

[4] Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. (1990). Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers. *Opt. Lett.*, 15, n° 8, pág. 1038-10-140.

[5] Nikles M., Thevenaz L., Robert P. A. (May 1996). Simple distributed fibre sensor based on Brillouin gain spectrum analysis. *Optics Letters*, 21, n° 10, p. 758-760.

30 [6] SEAFOM, Measurement Specification for Distributed Temperature Sensing + APPENDIX, 2010

**REIVINDICACIONES**

1. Proceso de calibración implementado en un dispositivo (10) de calibración óptica que comprende una fibra óptica (8), y una primera entrada, estando dispuesta la primera entrada (11) para:

- estar conectada a un primer emisor (61) dispuesto para emitir al menos un pulso óptico (5),
- 5 - recibir este al menos un pulso óptico
- inyectar este al menos un pulso óptico hacia la fibra óptica (8)

el dispositivo comprende además una salida (13) dispuesta para:

- recibir una señal retrodispersada generada en la fibra óptica,
- 10 - estar conectada a medios (63) de análisis dispuestos para analizar la señal retrodispersada generada en la fibra óptica,

comprendiendo la fibra óptica, al menos, un evento (9), siendo cada evento parte de la fibra óptica (8) y teniendo al menos un estado físico o propiedad modificados que son diferentes del estado físico o propiedad del resto de la fibra óptica, estando dispuesto el al menos un evento (9) en la fibra óptica para generar la señal retrodispersada, comprendiendo el dispositivo medios para crear diferentes trayectorias ópticas para el al menos un pulso óptico, 15 teniendo las diferentes trayectorias ópticas diferentes longitudes, pasando cada trayectoria óptica a través del al menos un evento (9)

caracterizándose el proceso por que:

- el emisor (61) está conectado a la primera entrada (11) y emite el al menos un pulso óptico (5),
- 20 - los medios (63) de análisis están conectados a la salida (13) y analizan la señal retrodispersada generada por el al menos un evento (9) en la fibra óptica,

dando el análisis de la señal retrodispersada un valor medido de una información relativa al menos a un evento, comprendiendo el proceso la etapa de comparar el valor medido con un valor de referencia de la información, si la diferencia entre el valor medido y el valor de referencia está por encima de un valor umbral, comprendiendo el proceso la etapa de corregir una calibración de los medios de análisis utilizados para medir el valor medido

25 siendo la información:

- una posición, una temperatura, una deformación, una presión, una vibración acústica y/o propiedades de birrefringencia de un evento (9), y/o
- una amplitud y/o frecuencia de la señal retrodispersada correspondiente a un evento (9), y/o
- 30 - una distancia espacial entre dos eventos diferentes o una diferencia de longitud entre dos de las diferentes trayectorias ópticas que pasan por el mismo evento.

2. Proceso según la reivindicación 1, caracterizado por que el análisis de la señal retrodispersada mide una resolución espacial para detectar el al menos un evento.

3. Proceso según la reivindicación 2, caracterizado por que:

- 35 - la resolución espacial se calcula a partir de la anchura espacial de una pendiente de una señal retrodispersada correspondiente a un evento (9), y/o
- el al menos un evento comprende una pluralidad de eventos (9), que comprenden segmentos de un segundo tipo de fibra (92), teniendo los segmentos del segundo tipo diferentes longitudes, comprendiendo la fibra (8) segmentos de fibra de un primer tipo de fibra (91), estando posicionados alternativamente los segmentos de fibra (91, 92) de dos tipos diferentes de fibras, midiéndose la resolución espacial a partir de diferentes señales retrodispersadas correspondientes a los diferentes segmentos del segundo tipo de fibra.
- 40

4. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que:

- el al menos un evento comprende una parte de fibra óptica que tiene al menos un estado físico diferente al resto de la fibra óptica, siendo este al menos un estado físico diferente una temperatura, una deformación, una presión, una vibración acústica, y /o
- 45 - el dispositivo utilizado para implementar el proceso comprende medios para aplicar, al menos a un evento, al menos un estado físico conocido, comprendiendo los medios para aplicar al menos un estado físico conocido un termostato, medios para aplicar una presión, fuerza o deformación conocidas y/o medios para aplicar una

vibración conocida.

5. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el al menos un evento comprende una parte de fibra óptica que tiene al menos una propiedad física diferente al resto de la fibra óptica, siendo esta al menos una propiedad física diferente una dimensión espacial, un material o propiedades de birrefringencia.

5 6. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el al menos un evento comprende una pluralidad de eventos (9), que comprenden segmentos de un segundo tipo de fibra (92), teniendo los segmentos del segundo tipo diferentes longitudes, comprendiendo la fibra (8) segmentos de fibra de un primer tipo de fibra (91), posicionándose alternativamente los segmentos de fibra (91, 92) de dos tipos diferentes de fibras.

10 7. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los medios para crear diferentes trayectorias ópticas comprenden:

- un acoplador (6),
- un bucle óptico (7),

estando insertado el acoplador (6) en el bucle óptico (7), y estando dispuesto de tal manera que:

- 15
- si una señal óptica entra en el acoplador desde el bucle con una primera dirección de circulación (21), esta señal óptica se reinyecta, al menos parcialmente, en el bucle con la primera dirección de circulación (21),
  - si una señal óptica entra en el acoplador desde el bucle con una segunda dirección de circulación (22), esta señal óptica es expulsada, al menos parcialmente, fuera del bucle hacia la salida (13)

20 estando dispuesto el acoplador (6) de tal manera que si la señal óptica entra dentro del acoplador (6) desde el bucle con la primera dirección de circulación (21), esta señal óptica se reinyecta parcialmente en el bucle con la primera circulación dirección (21), y es expulsada parcialmente fuera del bucle.

8. Proceso según la reivindicación 7, caracterizado por que el dispositivo utilizado para implementar el proceso comprende un amplificador óptico (15) en el bucle óptico (7), estando dicho amplificador dispuesto para amplificar la señal óptica que viaja en el bucle en la primera dirección (21), estando ubicado el acoplador (6) en el bucle después del amplificador (15) y antes del al menos un evento (9), siguiendo la primera dirección de circulación (21).

25 9. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores 7 a 8, caracterizado por que el al menos un evento (9) está en el bucle óptico (7).

10. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el dispositivo utilizado para implementar el proceso comprende además:

- 30
- una segunda entrada (12) dispuesta para:
    - o estar conectada a un segundo emisor (62) dispuesto para emitir una señal de sonda (55), y
    - o recibir esta señal de sonda
    - o inyectar esta señal de sonda hacia la fibra óptica (8).

11. Proceso según la reivindicación 10, caracterizado por que el dispositivo utilizado para implementar el proceso comprende además medios para inyectar la sonda en el bucle

35 el medio de inyección de la sonda en el bucle comprende un circulador (4), estando insertado el circulador (4) en el bucle y conectado a la segunda entrada (12), estando dispuesto el circulador (4) de tal manera que, después de ser emitida y/o recibida por la segunda entrada (12), la señal de la sonda (55) entra en el circulador (4), y es al menos parcialmente inyectada en el bucle (7)

40 el circulador (4) está dispuesto de tal manera que, después de ser emitida y/o recibida por la segunda entrada (12), la señal de la sonda (55) entra en el circulador (4), y se inyecta en el circuito (7)

el acoplador (6) está ubicado en el bucle después del circulador (4) y antes del al menos un evento (9), siguiendo la primera dirección de circulación (21)

el amplificador (15) está ubicado en el bucle después del circulador (4) y antes del acoplador (6), siguiendo la primera dirección de circulación (21)

45 la única dirección de circulación posible a través del circulador (4) en el circuito es la primera dirección de circulación (21), y no la segunda dirección de circulación (22)

los medios para inyectar la sonda en el circuito están dispuestos para inyectar al menos parcialmente la sonda en el

bucle con la segunda dirección de circulación (22).

12. Proceso según la reivindicación 10, caracterizado por que:

- el dispositivo utilizado para implementar el proceso no comprende ningún medio para inyectar la sonda en el bucle, y

5 - el al menos un evento (9) está fuera del bucle óptico (7).

13. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que los medios para crear diferentes trayectorias ópticas comprenden una cavidad dispuesta para hacer que la al menos una señal de pulso óptico viaje hacia delante y hacia atrás

estando el al menos un evento (9) en la cavidad,

10 estando delimitada la cavidad por dos rejillas de fibra de Bragg.

14. Proceso según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que los medios para crear diferentes trayectorias ópticas comprenden:

- un conmutador óptico dispuesto para seleccionar una trayectoria óptica entre las diferentes trayectorias ópticas, y

15 - acopladores que unen todas las diferentes trayectorias ópticas.

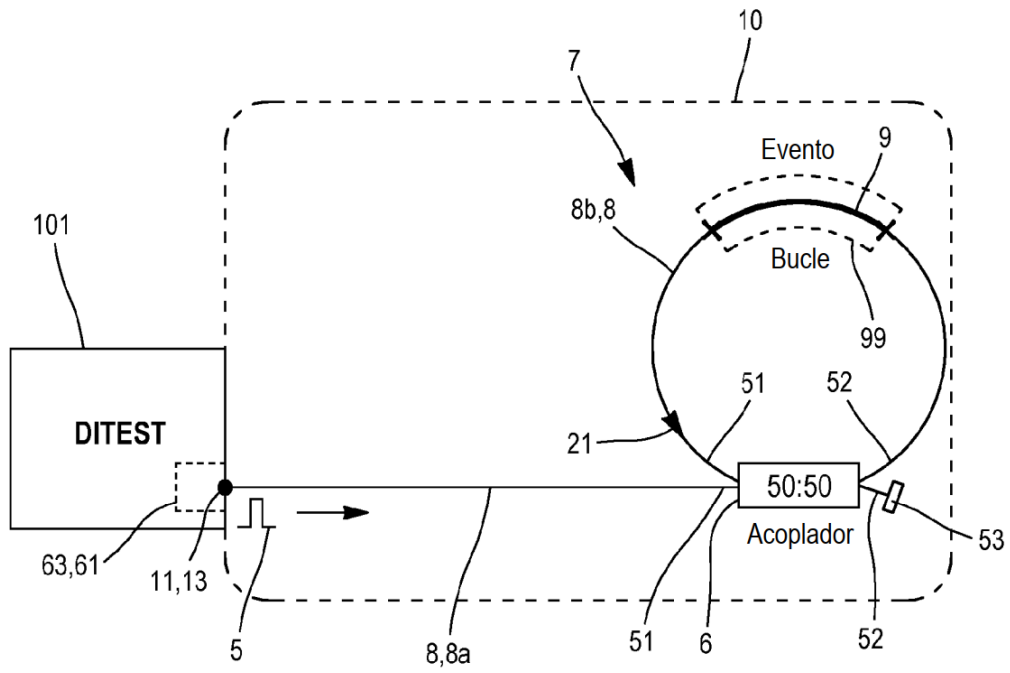


FIG. 1

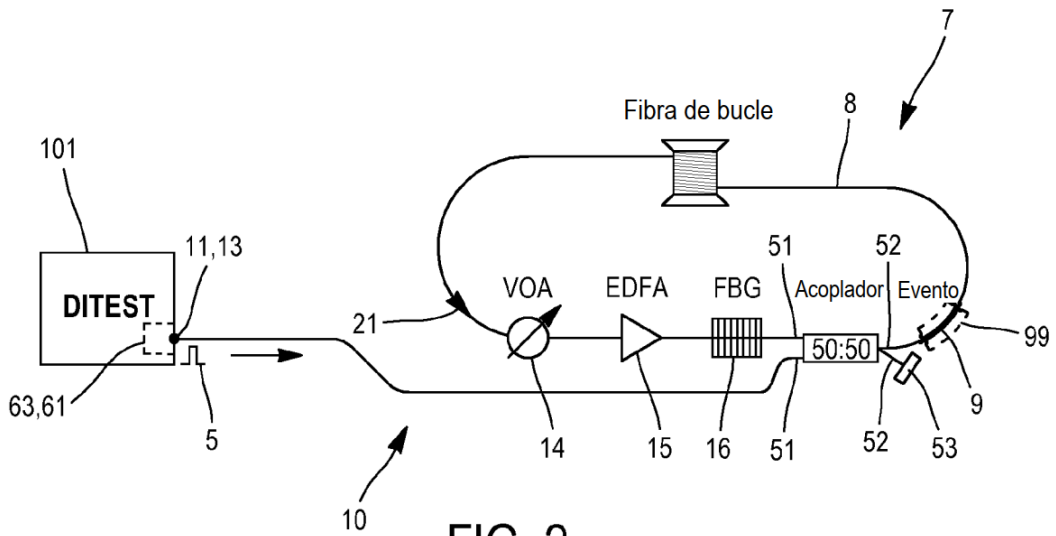


FIG. 2

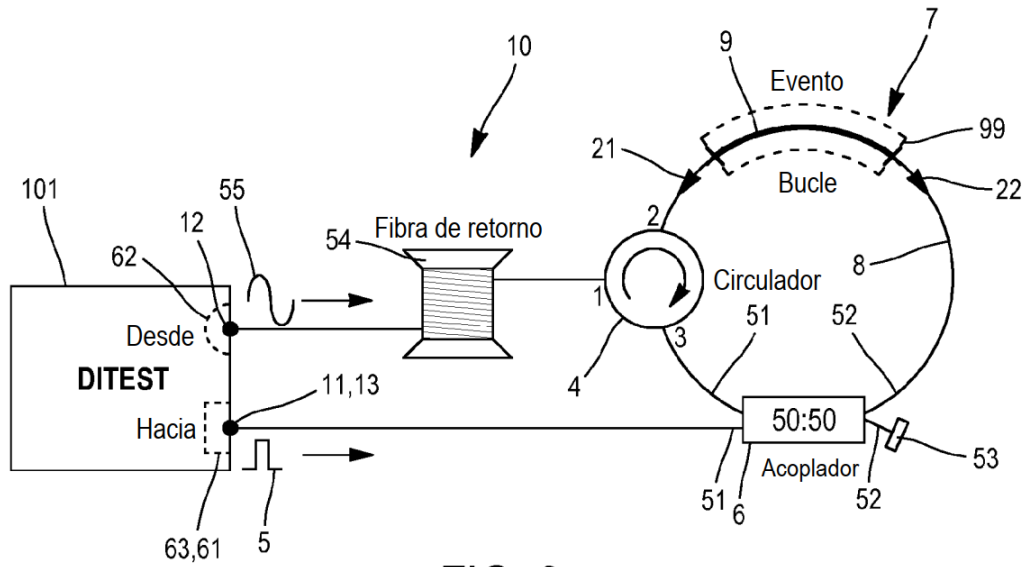


FIG. 3

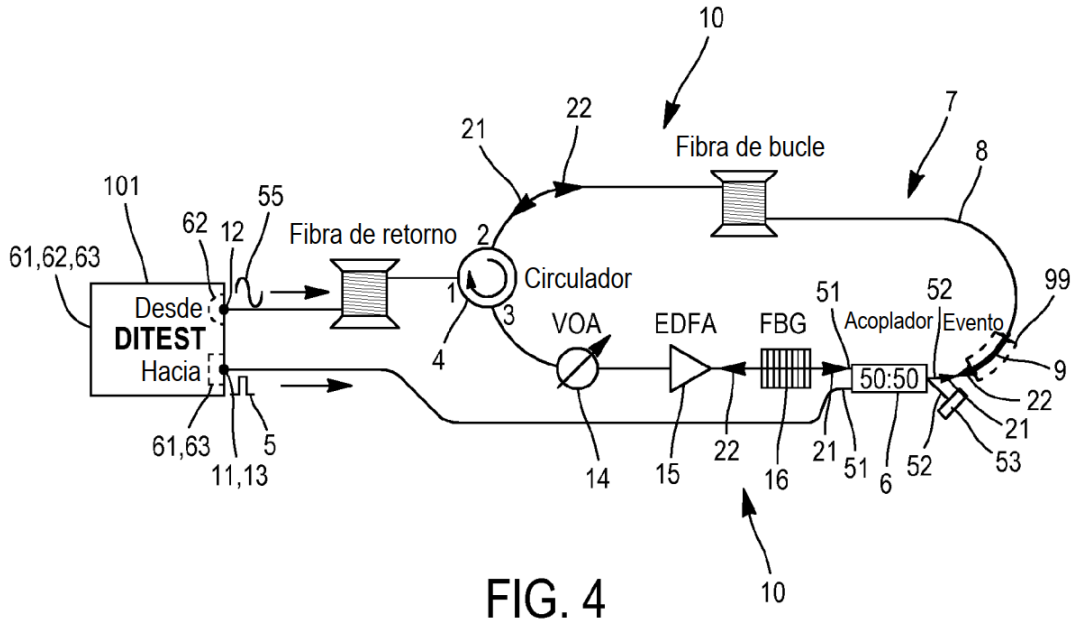


FIG. 4

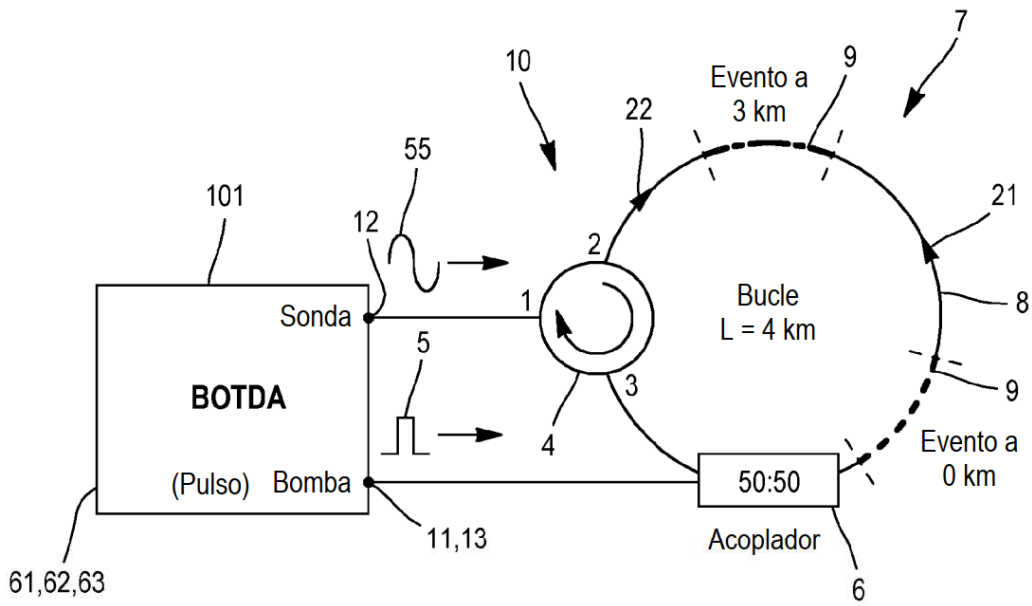


FIG. 5

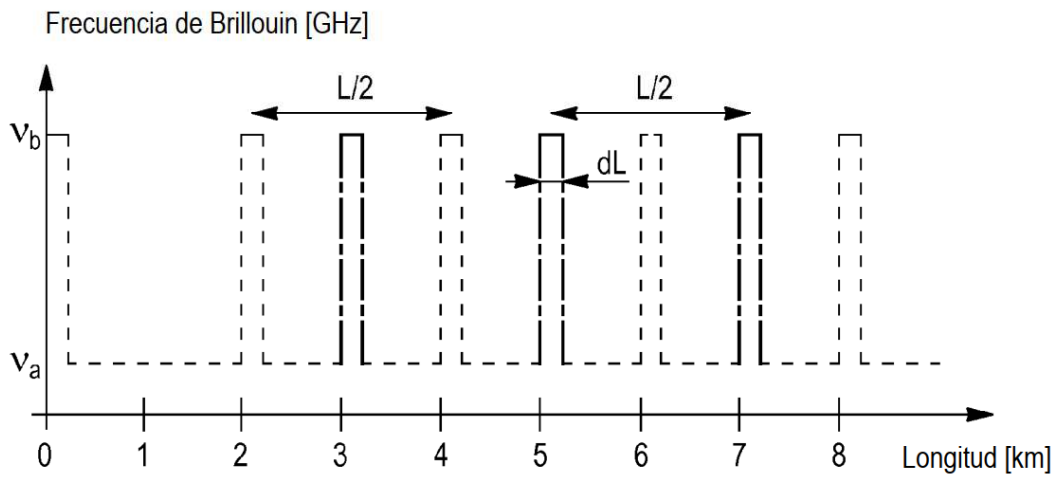


FIG. 6

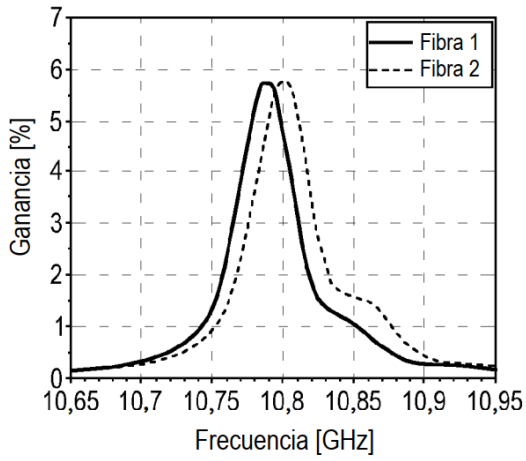


FIG. 7

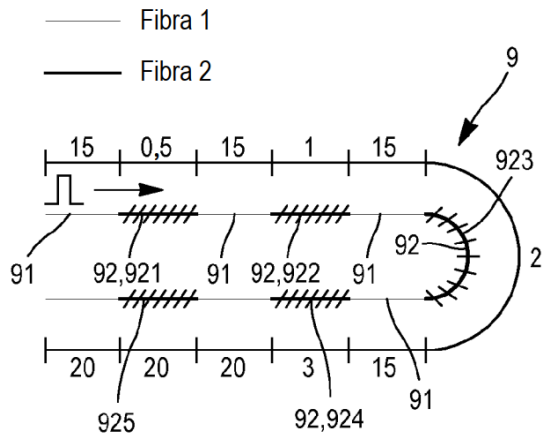


FIG. 8

Mediciones a 1 m de Resolución Espacial (SN1004)

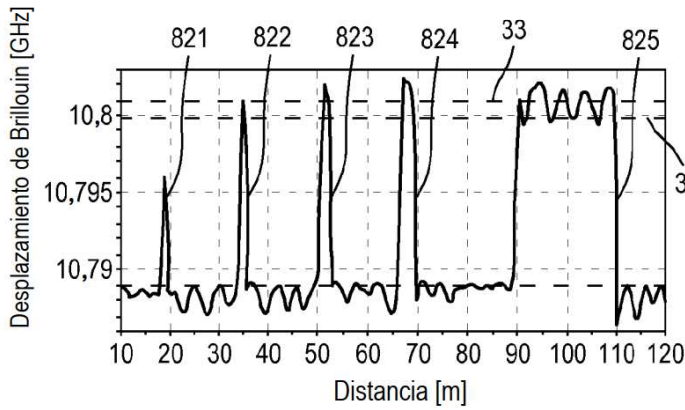


FIG. 9

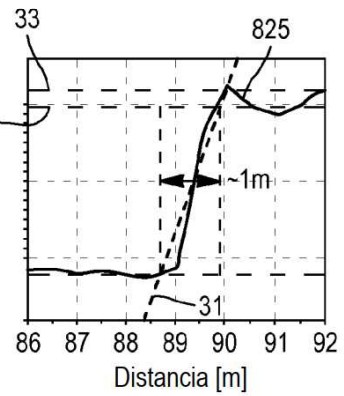


FIG. 10

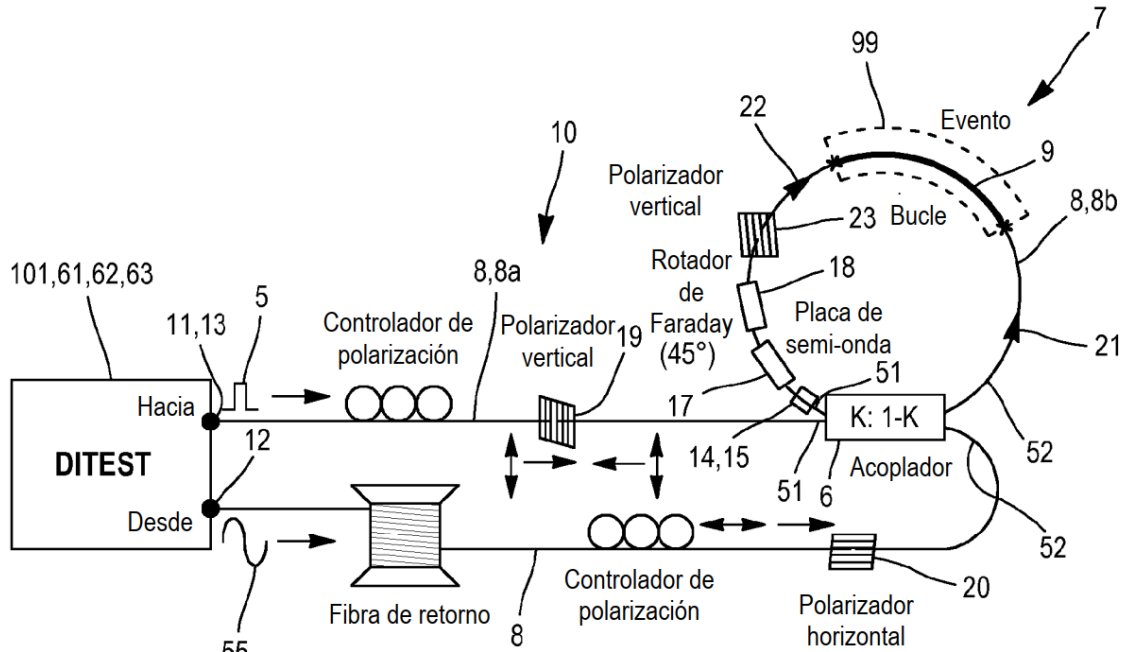


FIG. 11

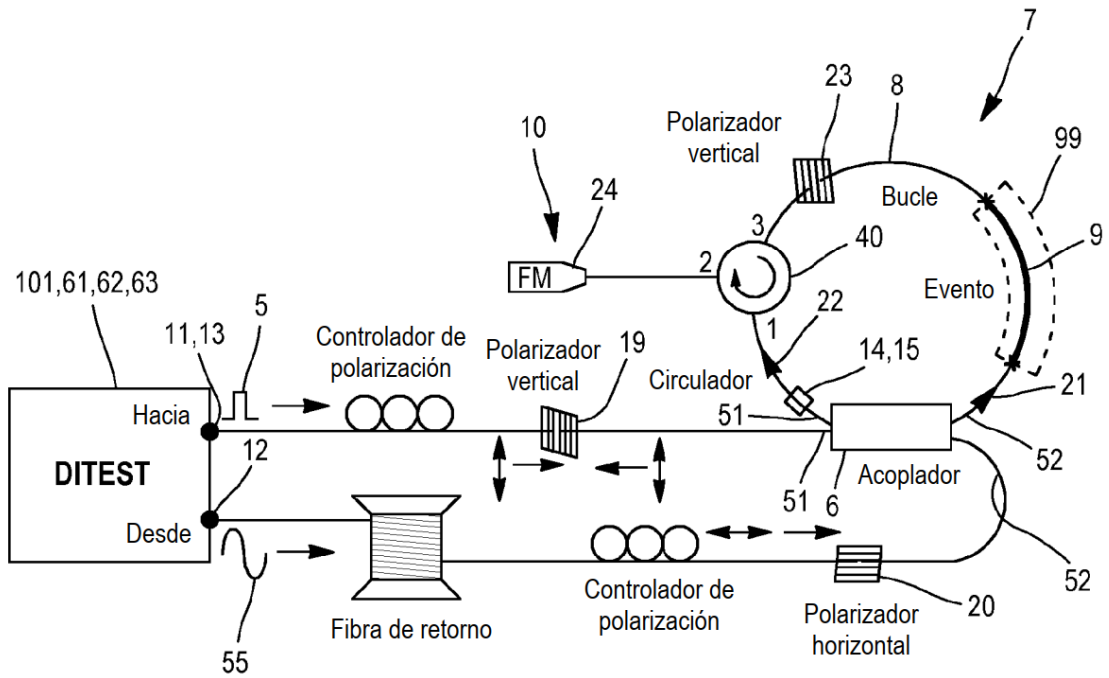


FIG. 12

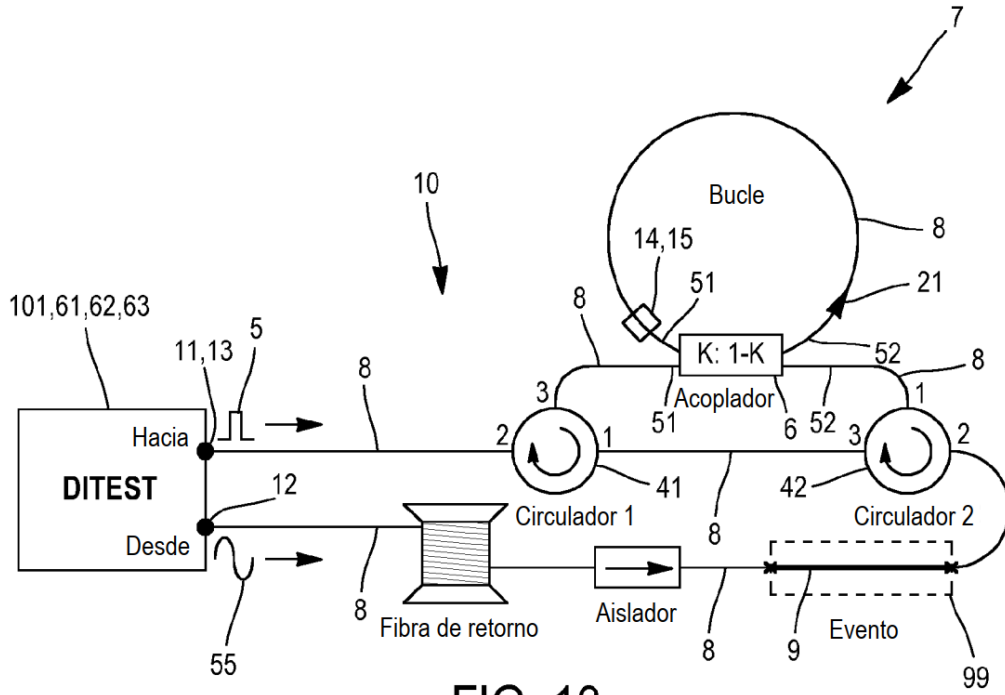


FIG. 13

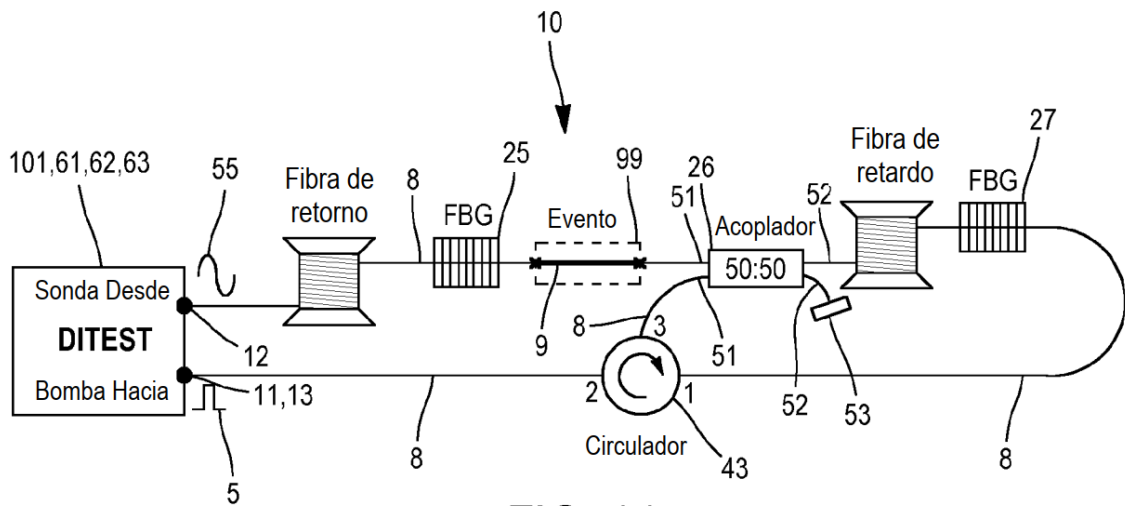


FIG. 14

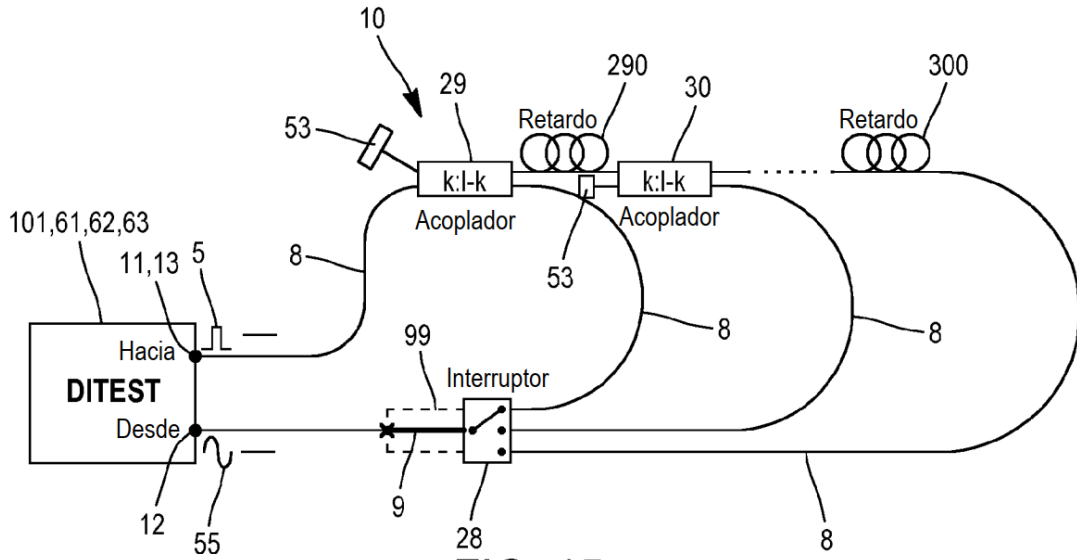


FIG. 15

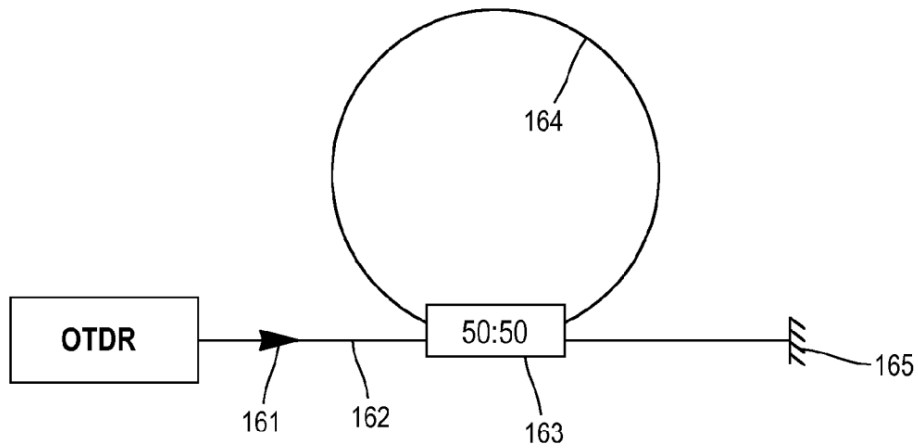


FIG. 16 Técnica Anterior

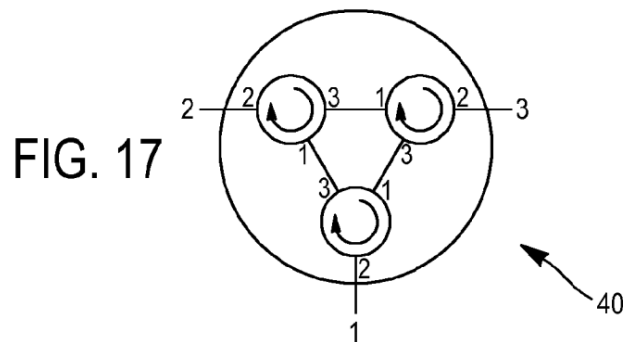


FIG. 17