

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 376 410**

51 Int. Cl.:
G01R 15/24 (2006.01)
G01R 33/032 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **09171889 .0**
96 Fecha de presentación: **30.09.2009**
97 Número de publicación de la solicitud: **2306212**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **06.04.2011**

54 Título: **DETECTOR DE CORRIENTE O DE CAMPO MAGNÉTICO DE FIBRA ÓPTICA, DE TEMPERATURA COMPENSADA, INSENSIBLE A LAS VARIACIONES EN LOS PARÁMETROS DEL DETECTOR.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
13.03.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
13.03.2012

73 Titular/es:
ABB Research Ltd.
Affolternstrasse 44
8050 Zürich

72 Inventor/es:
Wüest, Robert;
Frank, Andreas y
Bohnert, Klaus

74 Agente/Representante:
Ungría López, Javier

ES 2 376 410 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

Detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica, de temperatura compensada, insensible a las variaciones en los parámetros del detector

5 **Campo técnico**

La invención se refiere a un detector de corriente de fibra óptica (FOCS), o un detector de campo magnético, que comprende una fibra detectora que se expondrá a un campo magnético, por ejemplo de una corriente a medir. Este tipo de detector se usa típicamente en aplicaciones de alta tensión o alta corriente.

Técnica anterior

15 Los detectores de corriente de fibra óptica normalmente dependen del efecto Faraday en fibras de sílice pirógena. El efecto Faraday varía con la temperatura. La constante de Verdet V de la fibra de sílice pirógena, que es una medida del efecto Faraday, cambia de acuerdo con $(1/V)\partial V/\partial T = 7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, es decir, dentro de un intervalo de temperatura de operación de por ejemplo -40° a $+80^\circ \text{C}$, la señal del detector varía dentro del 0,84%. Muchas aplicaciones del detector requieren precisión dentro de $+0,2\%$ o $\pm 0,1\%$, sin embargo, y por lo tanto, requieren medidas para compensar la temperatura. En los documentos EP 1107029, EP 1115000 y la Ref. [1] se describe un método para la

20 compensación inherente de la temperatura del efecto Faraday en detectores de corriente interferométricos de fibra óptica Sagnac y de de tipo reflexión. El método de compensación inherente elimina la necesidad de un detector de temperatura extra, que es particularmente importante para detectar la corriente a altos potenciales eléctricos. El método aprovecha la dependencia de la temperatura del retardador de fibra óptica, que genera las ondas luminosas normalmente circulares que se propagan en la fibra detectora. Para compensar la temperatura, el retardo se ajusta a un valor que difiere en una cantidad ε distinta de cero respecto al retardo a 90° convencional. La variación del retardo con la temperatura afecta al factor de escala del detector. Al retardo elegido apropiadamente, por ejemplo con $\varepsilon = 10^\circ$, la influencia del retardador sobre la sensibilidad del detector (factor de escala S) solo equilibra la variación de la constante de Verdet con la temperatura.

30 En el documento WO 2005/111633 y la Ref. [2] se muestra que el factor de escala S del detector también está influido por el ángulo entre la normal del plano de la bobina de fibra y el eje lento de la polarización, manteniendo la fibra ante el retardador, denominado ángulo azimutal $\beta = 45^\circ - \beta'$, siendo β' el ángulo entre la normal del plano de la bobina de fibra y el eje lento del retardador. En ese caso, la bobina de fibra detectora consistía en un solo bucle de fibra de modo único no recocida, con gran radio de bucle y, de esta manera, una pequeña birrefringencia lineal inducida por torsión. La fibra reside en un capilar con medios reductores de la fricción y estaba empaquetada en una tira flexible de fibra de epoxi reforzada. La variación del factor de escala S con el ángulo azimutal β es de forma sinusoidal, y varía dentro del 0,8% en el caso de un retardador con $s = 10^\circ$ y un retardo birrefringente en la fibra detectora de $1,5^\circ$. Por lo tanto, para conseguir un factor de escala estable, el ángulo azimutal debe estar controlado y ser fijo. En la misma solicitud de patente se reivindican ángulos azimutales preferidos de $\beta = 0^\circ$ (módulo 90°) y $\beta = 45^\circ$ (módulo 90°) para conseguir una sensibilidad mínima del factor de escala a las variaciones de la birrefringencia inducida por torsión y el ángulo azimutal, respectivamente. Los efectos de la dependencia de la temperatura de la birrefringencia inducida por torsión [3] se consideraron insignificantes, puesto que en este caso eran muy pequeños. Sin embargo, es concebible una bobina de fibra detectora que consiste en varios bobinados de fibra (no recocida) de diámetro pequeño. Dichas bobinas pueden usarse, por ejemplo, para integración en un equipo de alta tensión (AT).

45 En bobinas de este tipo puede estar presente una mayor cantidad de birrefringencia de fibra, provocando un retardo de fase birrefringente de, por ejemplo, $\delta = 5 \text{ } 25^\circ$.

En el documento EP 0856737 y la Ref. [1] se explica un método de recocido a alta temperatura para reducir eficazmente la birrefringencia inducida por torsión en bobinas de fibra de pequeño diámetro, con varios bobinados de fibra. La fibra de dichas bobinas puede residir, de nuevo, en un capilar de vidrio, tanto durante el procedimiento de recocido como en la configuración final del detector. Dependiendo del diámetro de la bobina y el número de bobinados puede quedar algo de birrefringencia en la fibra detectora después del recocido. Los desplazamientos de fase birrefringente correspondientes pueden ser del orden de varios grados. Adicionalmente, en un entorno de producción, la birrefringencia puede variar de una bobina a otra en una cierta extensión. Las variaciones en la birrefringencia como resultado de tolerancias en el proceso de producción y/o debidas a variaciones de temperatura afectan a la compensación de la temperatura del efecto Faraday mencionada anteriormente. Esto es cierto tanto para bobinas recocidas como no recocidas.

Descripción de la invención

60 El problema a resolver por la presente invención, por lo tanto, es proporcionar un detector de corriente de fibra óptica o detector de campo magnético versátil, con pequeña sensibilidad a las variaciones en la birrefringencia de la fibra, por ejemplo debidas a tolerancias de fabricación o cambios de temperatura.

65 Este problema se resuelve mediante un detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica, que comprende

una fibra detectora que se expondrá a un campo magnético de una corriente I a medir, en el que dicha fibra detectora forma un bucle en un plano del detector, en el que dicha fibra detectora tiene una constante de Verdet V , al menos un retardador dispuesto entre una fibra para mantener la polarización y dicha fibra detectora, para llevar la luz entre la polarización lineal y elíptica, en el que un eje principal de la fibra para mantener la polarización (pm) inmediatamente antes de dicho retardador se hace girar con respecto a una normal de dicho plano del detector en un ángulo β , y en el que dicho retardador introduce un desplazamiento de fase diferencial $\rho = \pi/2 + \varepsilon$ entre ondas luminosas polarizadas a lo largo de sus ejes principales, siendo ε un desplazamiento de fase distinto de cero, adicional, y una unidad de control que genera una señal particular, proporcional al desplazamiento de fase inducido por corriente $\Delta\phi$, desplazamiento de fase que puede escribirse como

$$\Delta\phi = 4 S(\varepsilon, \delta, \beta, \varphi_F) \cdot j_F$$

con $\varphi_F = V \cdot N \cdot I$, y en la que N es un número de bucles de dicha fibra detectora, δ es un desplazamiento de fase inducido por birrefringencia lineal, de dicha fibra detectora y S es un factor de escala, en el que una derivada normalizada de S respecto a la temperatura T es

$$Z(\varepsilon(T), \delta(T), \beta, \varphi_F) = \frac{1}{S} \frac{\partial S(\varepsilon, \delta, \beta, \varphi_F)}{\partial T}$$

El detector está **caracterizado por que** β , ε y $Q = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ son tales que se satisface la condición

$$\left| \frac{1}{\Delta\phi} \frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial T} \right| < t_1$$

o equivalentemente la condición

$$\left| Z + \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \right| < t_1$$

sobre un amplio intervalo de valores de φ_F y para un valor distinto de cero del desplazamiento de fase inducido por

$$P = \frac{1}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial T}$$

birrefringencia δ , y su dependencia de la temperatura dada, al menos a una temperatura T_0 preferentemente en el centro del intervalo de temperatura operativa del detector, siendo t_1 un primer valor umbral menor de $7 \cdot 10^{-5}$ 1/K, en particular menor de $2 \cdot 10^{-5}$ 1/K. Esta condición, en lo que sigue, se denomina "primera condición".

$$Q = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$$

La dependencia de la temperatura, del retardo de fase diferencial ρ del retardador de fibra puede adaptarse en una cierta extensión, eligiendo apropiadamente los parámetros de fibra. La dependencia de la

$$P = \frac{1}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial T}$$

temperatura o el coeficiente de temperatura, de la birrefringencia lineal en la fibra detectora corresponde aproximadamente a $6 \cdot 10^{-4}$ 1/K [3].

En el detector de acuerdo con la presente descripción, la expresión desplazamiento de fase ε , así como el ángulo de orientación β de la fibra pm antes del retardador, se eligen ventajosamente de manera que la derivada normalizada del factor de escala S con respecto a la temperatura T es de signo opuesto y, preferentemente de magnitud similar o más preferentemente idéntica a la derivada normalizada de la constante de Verdet V con respecto a la temperatura T . Como se muestra a continuación, en estas condiciones, el retardador compensa, parcial o totalmente, la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet V de la fibra detectora. Cuando se compara con la técnica anterior, este esquema tiene dos grados de libertad adicionales, puesto que no solo ε , sino también Q y β pueden variarse. El esquema aún tiene un grado de libertad adicional si el valor de Q se considera fijado a Q_0 . Esta situación se considerará aquí por primera vez en la siguiente sección.

El grado de libertad adicional puede usarse para diversas optimizaciones.

En una realización ventajosa, el grado de libertad adicional se usa para elegir ε y β de manera que satisfagan,

ES 2 376 410 T3

además de la primera condición, la siguiente condición (ventajosamente a una temperatura T_0 en el centro del intervalo operativo del detector):

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \delta} \right| < t_2$$

5

siendo t_2 un segundo valor umbral menor de $2 \cdot 10^{-3}$ ($K^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$), en particular menor de $0,5 \cdot 10^{-3}$ ($K^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$).

10 En otras palabras, ε y β se eligen de manera que no solo se satisface la primera condición, sino que la primera condición se mantiene cierta (en aproximación lineal) incluso si varía la birrefringencia de la fibra detectora. Esto es particularmente útil para detectores de corriente en los que la fibra detectora es una fibra recocida, es decir, una fibra sometida a recocido térmico después de retorcerla en una bobina, porque en dichos sistemas el desplazamiento de fase inducido por la birrefringencia residual δ puede variar de un dispositivo a otro en un cierto grado, debido a las tolerancias en el proceso de recocido. Adicionalmente, esto también es útil para detectores con uno o varios bucles de fibra no recocida. Dichas bobinas no recocidas pueden tener una birrefringencia significativamente mayor que las bobinas recocidas y, como resultado, una mayor variación absoluta en δ como una función de la temperatura.

15

En otra realización ventajosa, el grado de libertad adicional se usa para elegir ε y β de manera que satisfagan, aparte de la primera condición, la siguiente condición:

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < t_3,$$

20

siendo t_3 un tercer valor umbral menor de $0,2 \text{ rad}^{-1}$, en particular menor de $0,05 \text{ rad}^{-1}$.

25 En otras palabras, ε y β se eligen de manera que no solo se satisface la primera condición, sino que también el factor de escala S es independiente (en aproximación lineal) de las variaciones en la birrefringencia de la fibra detectora, por ejemplo debidas a cambios potenciales en la birrefringencia con el tiempo.

25

En otra realización ventajosa más, el grado de libertad adicional se usa para elegir ε y β de manera que satisfagan, aparte de la primera condición, la siguiente condición:

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \beta} \right| < t_4$$

30

siendo t_4 un cuarto valor umbral menor de $0,06 \text{ [rad}^{-1}]$, en particular menor de $0,01 \text{ [rad}^{-1}]$. En este caso, en aproximación lineal, S es independiente de β , lo que hace al diseño menos dependiente de las tolerancias de fabricación en el ángulo de orientación del retardador. Para los casos en los que la birrefringencia intrínseca de la fibra es insignificante o los ejes de la birrefringencia intrínseca coinciden con los ejes de la birrefringencia inducida por torsión, la condición anterior se satisface para $\beta \bmod 90^\circ = 45^\circ$, es decir, $\beta = 45^\circ, 135^\circ$, etc.

35

En otra realización ventajosa más, el grado de libertad adicional se usa para elegir ε y β de manera que satisfagan, aparte de la primera condición, la siguiente condición:

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right| < t_5$$

40

siendo t_5 un quinto valor umbral menor de $5 \cdot 10^{-4}$ ($K^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$), en particular menor de $1 \cdot 10^{-4}$ ($K^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$). En este caso, en aproximación lineal, Z es independiente de β , lo que hace al diseño menos dependiente de las tolerancias de fabricación en el ángulo de orientación del retardador. Para los casos en los que la cantidad de birrefringencia intrínseca lineal en la fibra es insignificante, o su eje lento coincide con un eje de la birrefringencia inducida por torsión, la condición anterior se satisface mejor para $\beta \bmod 90^\circ = 45^\circ$, es decir, $\beta = 45^\circ, 135^\circ$, etc.

45

50 En los casos en los que la dependencia de la temperatura del retardador Q puede elegirse también, por ejemplo mediante una elección apropiada del tipo de fibra para mantener la polarización (por ejemplo, fibra para mantener la polarización (PM) de núcleo elíptico, fibra PM inducida por tensión tal como Panda, Bowtie, vaina elíptica) o mediante una elección apropiada de los parámetros de una fibra PM específica (por ejemplo, el dopado o la geometría del núcleo de la fibra), el esquema detector presentado tiene dos grados de libertad adicionales después de haber satisfecho la primera condición. Los dos grados de libertad pueden usarse para optimizaciones adicionales.

50

55 En otra realización ventajosa más, los dos grados de libertad adicionales se usan para elegir Q , ε y β , de manera que, aparte de la primera condición, satisfagan las dos condiciones siguientes:

55

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \delta} \right| < t_2 \quad \text{y} \quad \left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < t_3,$$

5 siendo t_2 y t_3 los umbrales definidos anteriormente. En este caso, Q , ε y β se eligen de manera que no solo se satisface la primera condición, sino que también en aproximación lineal, S y Z son independientes respecto a δ , lo que hace al diseño menos dependiente de las tolerancias de fabricación y de los cambios potenciales en la birrefringencia con el tiempo en la fibra detectora, sea para bobinas detectoras recocidas o no recocidas.

10 En otra realización ventajosa más, los dos grados de libertad adicionales se usan para elegir Q , ε y β de manera que, aparte de la primera condición, satisfagan las dos condiciones siguientes:

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \delta} \right| < t_2 \quad \text{y} \quad \left| \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right| < t_5$$

15 siendo t_2 y t_5 los umbrales definidos anteriormente. En este caso, Q , ε y β se eligen de manera que no solo se satisface la primera condición, sino que también en aproximación lineal, Z es independiente de δ y β , lo que hace al diseño menos dependiente de las tolerancias de fabricación con respecto a la birrefringencia de la fibra detectora δ y el ángulo de orientación β del retardador, así como de los cambios potenciales en la birrefringencia δ con el tiempo, sea para bobinas detectoras recocidas o no recocidas.

20 En otra realización ventajosa más, los dos grados de libertad adicionales se usan para elegir Q , ε y β de manera que, aparte de la primera condición, satisfagan las dos condiciones siguientes:

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \delta} \right| < t_2 \quad \text{y} \quad \left| \frac{\partial S}{\partial \beta} \right| < t_4$$

25 siendo t_2 y t_4 los umbrales definidos anteriormente. En este caso, Q , ε y β se eligen de manera que no solo se satisface la primera condición, sino que también en aproximación lineal, Z es independiente de δ y S es independiente de β , lo que hace al diseño menos dependiente de las tolerancias de fabricación en δ y el ángulo de orientación β del retardador, así como de los cambios potenciales en la birrefringencia con el tiempo en la fibra detectora, sea para bobinas detectoras recocidas o no recocidas.

30 En otra realización ventajosa más, los dos grados de libertad adicionales se usan para elegir Q , ε y β de manera que, aparte de la primera condición, satisfagan las dos condiciones siguientes:

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < t_3 \quad \text{y} \quad \left| \frac{\partial S}{\partial \beta} \right| < t_4$$

35 siendo t_3 y t_4 los umbrales definidos anteriormente. En este caso, Q , ε y β se eligen de manera que no solo se satisface la primera condición, sino que también, en aproximación lineal, S es independiente de δ y β , lo que hace al diseño menos dependiente de las tolerancias de fabricación en el ángulo de orientación β del retardador, así como de los cambios potenciales en la birrefringencia con el tiempo en la fibra detectora, sea para bobinas detectoras recocidas o no recocidas.

En otra realización ventajosa más, los dos grados de libertad adicionales se usan para elegir Q , ε y β de manera que, aparte de la primera condición, satisfagan las dos condiciones siguientes:

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < t_3 \quad \text{y} \quad \left| \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right| < t_5$$

40 siendo t_3 y t_5 los umbrales definidos anteriormente. En este caso, Q , ε y β se eligen de manera que no solo se satisface la primera condición, sino que también, en aproximación lineal, S es independiente de δ y Z es independiente de β , lo que hace al diseño menos dependiente de las tolerancias de fabricación en el ángulo de orientación β del retardador, así como de los cambios potenciales en la birrefringencia con el tiempo en la fibra detectora, sea para bobinas detectoras recocidas o no recocidas.

45 Para los casos en los que la birrefringencia intrínseca de fibra es insignificante, o los ejes de la birrefringencia intrínseca coinciden con los ejes de la birrefringencia inducida por torsión, la elección óptima del parámetro β para conseguir intensidad de S y Z contra el ángulo de orientación β es al mismo valor, en concreto se satisface

simultáneamente para $\beta \bmod 90^\circ = 45^\circ$, es decir, $\beta = 45^\circ, 135^\circ$, etc., y los parámetros ε y Q pueden elegirse de manera que se satisfice la primera condición y

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \delta} \right| < l_2 \quad \text{o} \quad \left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < l_3.$$

5 En las reivindicaciones dependientes se indican diversas realizaciones ventajosas, así como en la descripción a continuación.

10 El detector de acuerdo con las diversas realizaciones de la invención minimiza la sensibilidad del esquema de compensación de la temperatura y/o el factor de escala S a variaciones en la birrefringencia de fibra δ u otros parámetros, por ejemplo, debido a tolerancias de fabricación o efectos de envejecimiento. Esto es importante particularmente para bobinas de pequeño diámetro con varios bobinados, según sea necesario, por ejemplo en aplicaciones de AT, ya que aquí el retardo de fase birrefringente δ y su variación con la temperatura normalmente son mayores que en bucles de una sola fibra de gran diámetro como se usan, por ejemplo, en la medición de altas corrientes CC, véase el documento WO 2005/111633 y la Ref. [2].

15 La variación del factor de escala del detector, S , con la temperatura está influida por el retardo $\rho = 90^\circ + \varepsilon$ del retardador, por el ángulo azimutal β , y la birrefringencia de fibra δ . Mediante una elección apropiada de ρ y β , puede diseñarse una bobina detectora que sea insensible a la temperatura e independiente de pequeñas variaciones en la birrefringencia de la fibra δ . Cuando se tiene en cuenta la propia dependencia de la temperatura de δ , se ve que la elección apropiada del ángulo azimutal β se desvía del ángulo de 0° mencionado anteriormente en una cantidad significativa, por ejemplo en $\Delta\beta = 9^\circ$ para propiedades de fibra típicas. La elección del ángulo azimutal β y el retardo ρ correspondiente está basada en la evaluación numérica de la dependencia de la temperatura del factor de escala que está derivado de las ecuaciones dadas en la Ref. [2] y, adicionalmente, de la dependencia de la temperatura de la birrefringencia inducida por torsión como se da en la Ref. [3].

Breve descripción de los dibujos

20 La invención se entenderá mejor y los objetos distintos de los expuestos anteriormente resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de los mismos. Dicha descripción hace referencia a los dibujos anexos, en los que:

- 35 La Fig. 1 es un diagrama de un detector de corriente de fibra óptica,
- La Fig. 2 muestra una realización de un retardador de fibra óptica,
- La Fig. 3 ilustra la orientación rotacional del retardador y la fibra para mantener la polarización antes del retardador, con respecto al plano de la fibra detectora,
- La Fig. 4 muestra el factor de escala S como una función del ángulo azimutal β ,
- La Fig. 5 muestra la dependencia de la temperatura Z del factor de escala S frente al ángulo azimutal β ,
- La Fig. 6 es una sección ampliada VI del gráfico de la Fig. 5,
- 40 La Fig. 7 muestra el impacto de la variación de la birrefringencia X sobre la dependencia de la temperatura del factor de escala Z como una función del ángulo azimutal β ,
- La Fig. 8 muestra el ángulo azimutal óptimo β_{opt} frente a la birrefringencia δ para $X = 0$,
- La Fig. 9 muestra la tolerancia del ángulo azimutal $\Delta\beta$ frente a la birrefringencia δ para $X = 0$,
- La Fig. 10 muestra el término de retardo óptimo ε_{opt} frente a la birrefringencia δ para $X = 0$,
- 45 La Fig. 11 muestra el término de factor de escala S , la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet, y sus contribuciones combinadas de un detector de temperatura compensado como una función de la temperatura T para una bobina no recocida con cuatro bobinados, un diámetro de la bobina de 15 cm, y un diámetro de fibra de 80 μm .
- 50 La Fig. 12 muestra el factor de escala S como una función de $4_{\phi F}$ para tres retardos ρ diferentes, a ángulos azimutales β de $45^\circ, 90^\circ$ y 135° .

Modos para realizar la invención

Diseño del detector

55 En la Fig. 1 se representa el principio operativo de un detector de corriente de fibra óptica como se describe en [1]. Dos ondas luminosas polarizadas linealmente, ortogonales, se envían desde una unidad de control 1 a través de una fibra conectora para mantener la polarización (fibra pm) 2 a un cabezal detector, generalmente denotado como 3. El cabezal detector 3 comprende un retardador óptico 4, una fibra detectora 5, y un reflector 7.

60 El retardador 4 es, por ejemplo, un retardador de fibra óptica con un núcleo elíptico, y sirve para convertir entre la luz

polarizada linealmente en la fibra pm 2 y la luz polarizada elípticamente en la fibra detectora 5. Tiene dos ejes principales y su retardo está adaptado para inducir un desplazamiento de fase $\pi/2 + c$ entre ondas luminosas polarizadas a lo largo de sus ejes principales, siendo ε un desplazamiento de fase distinto de cero, adicional.

5 La fibra detectora 5 forma un bucle $N > 0$ veces alrededor de uno o más conductores de corriente 6 que llevan la corriente I , que hay que medir. En la presente realización, un reflector 7 está dispuesto al final de la fibra detectora 5 para reflejar la luz de vuelta a través de la fibra detectora 5, el retardador 4, la fibra pm 2 en una unidad de control 1. Las ondas luminosas circulares derecha e izquierda tienen diferentes velocidades de fase mientras se desplazan por el campo magnético alrededor del conductor, debido al efecto Faraday. En la realización de la Fig 1, las ondas
10 luminosas adquieren una diferencia de fase $\Delta\phi$ dada por

$$\Delta\phi = 4 \cdot \varphi_V = 4 V N I \quad (1)$$

Aquí, V es la constante de Verdet, N es el número de bucles de fibra detectora alrededor del conductor 6, e I es la corriente. La ec. (1) es válida para una bobina de fibra libre de cualquier birrefringencia lineal ($\delta = 0$) y ondas
15 luminosas perfectamente circulares ($\varepsilon = 0^\circ$).

Después de volver a transformarse en polarizaciones lineales por el retardador 4, la diferencia de fase introducida por el campo magnético es medida por la unidad de control 1 con una técnica adaptada de los giroscopios de fibra óptica [1, 4].
20

El retardador 4 es, preferentemente, un retardador de fibra óptica fabricado al final de una sección de fibra para mantener la polarización 2 adyacente a la fibra detectora 5 de baja birrefringencia, como se muestra en la Fig. 2. En la Fig. 2, el eje principal lento de la fibra del retardador está orientado a $+45^\circ$ con respecto a un primer eje principal de la fibra pm inmediatamente antes del retardador como se muestra en la Fig. 3. (Obsérvese que para hacer a
25 la definición de β no ambigua, el eje principal de la fibra pm 2 se elige de manera que el eje principal lento de la fibra del retardador está orientado a $+45^\circ$ con respecto al primer eje principal de la fibra pm 2. El eje principal lento de la fibra del retardador se orienta después a -45° con respecto al otro segundo eje principal de la fibra pm 2).

Como la fibra para mantener la polarización 2 podrían usarse varios tipos de fibras para mantener la polarización, por ejemplo una fibra o fibras de núcleo elíptico con un campo de tensión interna (Panda, Bowtie, vaina elíptica). Este tipo de dispositivo se describe en el documento EP 1107029.
30

Como se ha mencionado, el retardo del retardador 4 se desvía del retardo de $\pi/2$ de un retardador de cuarto de onda perfecto en una cantidad elegida apropiadamente (es decir, el desplazamiento de fase entre los dos modos de polarización ortogonal es $\rho > \pi/2$ o $\rho < \pi/2$), para compensar la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet V . El retardo del retardador 4 se elige de manera que las dos fuentes principales de dependencia de la temperatura del factor de escala se compensen entre sí: (i) $V(T)$, el aumento de la constante de Verdet V con la temperatura T y (ii) $S(T)$, la disminución del término del factor de escala S debido al cambio inducido por temperatura en el retardo ρ y el aumento inducido por temperatura de la birrefringencia δ . Nota: las fibras de núcleo elíptico que
35 pueden usarse preferentemente para la fabricación del retardador normalmente presentan una disminución de ρ al aumentar la temperatura. Una longitud óptica elegida correctamente del retardador (por ejemplo, $\rho \sim 100^\circ$ para una dependencia de la temperatura Q dada de ρ y una pequeña cantidad de birrefringencia en la fibra) permite compensar la dependencia de la temperatura del efecto magneto-óptico, es decir, fabricar un detector con un factor de escala global independiente de la temperatura. La elección del retardo ρ correcto del retardador puede ser
40 también $\rho < 90^\circ$, y depende de los valores de los siguiente parámetros: la birrefringencia δ presente en la fibra detectora y su dependencia de la temperatura P , el ángulo azimutal ρ y la dependencia de la temperatura Q de ρ . La independencia de la temperatura del detector es necesaria para satisfacer los requisitos de precisión (precisión dentro de $\pm 0,2\%$ o incluso $\pm 0,1\%$ sobre una temperatura de, por ejemplo, -40 a 85°C) en aplicaciones detectoras típicas.
45

50 *Principio operativo*

Como se mostraba en el documento WO 2005/111633 y la Ref. [2], el factor de escala de un detector con temperatura compensada ($\rho \neq 90^\circ$) con birrefringencia de fibra lineal ($\delta \neq 0^\circ$) está influido por tres parámetros del
55 cabezal detector: el retardo $\rho = \pi/2 + \varepsilon$ del retardador, la birrefringencia δ en la fibra detectora y el ángulo azimutal β . El ángulo azimutal β se muestra en la Fig. 3 como el ángulo entre un eje principal x de la fibra pm antes del retardador 4 y el vector normal n del plano en el que reside la bobina de fibra detectora 5.

60 Nota:

El parámetro δ se refiere a la birrefringencia lineal de fibra inducida por torsión o birrefringencia lineal residual de fibra inducida por torsión que queda después del recocido térmico de una bobina de fibra. Además, puede haber birrefringencia lineal de fibra intrínseca δ_i , por ejemplo, debido a anisotropías de la fibra o tensión acumulada.

Habitualmente, δ_i puede considerarse insignificante para las fibras detectoras de baja birrefringencia del estado de la técnica.

El desplazamiento de fase magneto-óptica $\Delta\phi$ observado por el presente dispositivo puede escribirse como

$$\Delta\phi = 4 S(\varepsilon, \delta, \beta, \varphi_F) \cdot \varphi_F \quad (2)$$

con

$$j_F = V \cdot N \cdot l$$

S es un término del factor de escala normalizado. S es igual a la unidad para $\varepsilon = 0^\circ$ y $\delta = 0^\circ$. En el caso general, $\Delta\phi$ se da mediante [2]

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{2U}{1-U^2}\right) \quad (3)$$

con

$$U = \frac{2\varphi_F \frac{\tan(\Gamma)}{\Gamma}}{\cos(\varepsilon) - \delta \frac{\tan(\Gamma)}{\Gamma} \frac{\tan(\Gamma)}{\Gamma}}, \quad (4)$$

$$\Gamma = \left[\delta'^2 + (2\varphi_F)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\delta' = \left[\delta^2 + \delta_i^2 + 2\delta\delta_i \cos(2(\beta_i - \beta)) \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{\delta_i \sin(2(\beta_i - \beta))}{\delta + \delta' + \delta_i \cos(2(\beta_i - \beta))}\right)$$

Aquí, β_i define los ejes de la birrefringencia intrínseca de fibra. En lo que sigue, la birrefringencia intrínseca δ_i se considera insignificante si no se menciona lo contrario. Adicionalmente, en los ejemplos a continuación se consideran pequeños desplazamientos de fase de Faraday, es decir, se supone que $\varphi_F \ll 1$. Este es el caso a las corrientes consideradas típicas en subestaciones de alta tensión (hasta unos pocos kiloamperios) y bobinas de fibra que tienen un pequeño número de bobinados de fibra (por ejemplo, 1-10 bobinados). Las modificaciones a mayores desplazamientos de fase de Faraday se abordan adicionalmente más adelante. A pequeños desplazamientos de fase del Faraday puede suponerse que el término del factor de escala $S = S(\varepsilon, \delta, \beta, \varphi_F)$ es independiente de φ_F , es decir, S es entonces solo una función de ε , δ y β . Con aproximaciones precisas en líneas generales dentro de $\Delta S/S = 10^{-4}$, S se da mediante [2]:

$$S(\varepsilon, \delta, \beta) = \frac{1 + \frac{1}{3}\delta^2}{\cos(\varepsilon) - \delta \sin(2\beta) \sin(\varepsilon)} \quad (7)$$

En la Fig. 4 se representa la dependencia del término del factor de escala S del ángulo azimutal β para diferentes valores de δ . Puede verse que, para una birrefringencia δ no insignificante en la fibra detectora, el factor de escala del detector S se hace sensible al ángulo azimutal. Puede mostrarse que la variación pico a pico de S frente a β aumenta en proporción al producto de δ y ε . La desviación del valor medio de S de la unidad es aproximadamente igual a $(1/3)\delta^2 + (1/2)\varepsilon^2$.

Para minimizar la dependencia de la temperatura del desplazamiento de fase $\Delta\phi$ de la Ec. (2), la dependencia normalizada de la temperatura Z del factor de escala S debería ser igual aunque de signo opuesto a la dependencia normalizada de la temperatura de la constante de Verdet V , es decir

$$Z = \frac{1}{S} \frac{\partial S(\varepsilon, \delta, \beta)}{\partial T} = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \quad (8)$$

El gráfico de la Fig 5 muestra la variación en la dependencia global de la temperatura $Z + 1/V \cdot \partial V/\partial T$ de la bobina de fibra como una función del ángulo azimutal β para diferentes cantidades de birrefringencia δ y un retardo $\rho = 99,2^\circ$ del retardador. Para un valor de $\delta = 7,5^\circ$, Z varía tanto como aproximadamente $\pm 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ como una función de β . Idealmente, el factor de escala del detector S debería ser independiente de temperatura, es decir

$$Z = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \quad (9)$$

En la práctica, un ajuste preciso como en la Ec. (9) no puede conseguirse y, por lo tanto, la desviación de la igualdad en (9) debería ser menor de un primer valor umbral t_1 razonablemente pequeño, es decir.

$$\left| Z + \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \right| < t_1 \quad (9')$$

Un primer valor umbral típico t_1 es $7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$, es decir, la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet. En muchos casos, la dependencia de la temperatura puede ser suficiente si t_1 es menor de $2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ o menor de $1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$.

La ec. (9), evaluada bajo la suposición de que δ es dependiente de la temperatura, es decir, $\partial\delta/\partial T \neq 0$, proporciona una condición entre los valores de Q , ε y β que, si se satisface, conduce a una independencia inherente de la temperatura del dispositivo, incluyendo los efectos de la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet y la dependencia de la temperatura de la birrefringencia δ . Debe observarse, sin embargo, que la ec. (9) aún tiene dos grados de libertad, que pueden usarse, por ejemplo, para optimizar los valores de Q , ε y β en vista de criterios de diseño adicionales.

A continuación se describen ejemplos de algunos de estos criterios de diseño adicionales, que pueden usarse para optimizar el diseño del detector eligiendo valores adecuados para Q , ε o β .

Minimización de la dependencia de Z respecto a δ

En el documento EP 0856737 y la Ref. [1] se explica un método de recocido térmico para reducir eficazmente la birrefringencia inducida por torsión para bobinas de fibra de pequeño diámetro (por ejemplo, con diámetros de 100 - 200 mm) con diversos bobinados, según sea necesario, por ejemplo, para subestaciones de alta tensión. No obstante, la birrefringencia puede permanecer en la fibra detectora después del recocido, lo que puede inducir un desplazamiento de fase diferencial δ del orden de varios grados, dependiendo del diámetro de la bobina y el número de bobinados. Adicionalmente, esta birrefringencia residual puede variar de una bobina a otra en una cierta extensión en un entorno de producción: $\delta = \delta_0 \pm \Delta\delta$.

Por lo tanto, idealmente, el valor de Z debería ser independiente (en aproximación lineal) de las variaciones en δ como resultado, por ejemplo, de las tolerancias de fabricación, es decir:

$$X(\varepsilon, \beta, \delta) = \frac{\partial Z}{\partial \delta} = \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} \right) = 0 \quad (10)$$

Como antes, un ajuste preciso de la condición de la Ec. (10) no puede conseguirse debido a las tolerancias de fabricación y, por lo tanto, el error en (10) debería ser menor de un segundo valor umbral t_2 razonablemente pequeño, es decir

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \delta} \right| < t_2 \quad (10')$$

Un segundo valor umbral t_2 típico, que da una buena independencia de la temperatura, pero que tiene en cuenta las tolerancias de fabricación es $2 \cdot 10^{-3} \text{ (K}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1})$, en particular menor de $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ (K}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1})$.

De acuerdo con el estado de la técnica, como se explica en el documento WO 2005/111633, un ángulo azimutal preferido es $\beta = 0^\circ$ (módulo 90°). Aquí, se consideraba una bobina de fibra detectora con un solo bucle de fibra no recocida con gran radio y, por tanto, con una pequeña birrefringencia inducida por torsión ($\delta = 1^\circ - 2^\circ$). El diseño de dicha bobina es de interés, por ejemplo, para aplicaciones en el electro-bobinado de metales, tales como aluminio.

5 Las variaciones de δ con la temperatura pueden considerarse insignificantes en este caso, debido al pequeño valor de δ . En el caso de mayores cantidades de birrefringencia, por ejemplo la birrefringencia restante en bobinas de fibra detectora recocidas de pequeño diámetro o la birrefringencia total inducida por torsión de bobinas no recocidas de pequeño diámetro, el valor óptimo de β , como se requiere para minimizar la sensibilidad a la temperatura y variaciones de birrefringencia $\Delta\delta$, se desvía de $\beta = 0^\circ$ debido al hecho de que $\partial\delta/\partial T \neq 0$. Esto puede verse a partir de la Fig. 6, que es una ampliación de la sección VI de la Fig. 5, donde el cruzamiento cero de $Z(\beta)$ se ve que se mueve a valores mayores de β para cantidades en aumento de birrefringencia δ . Adicionalmente, el cruzamiento mutuo de las curvas $Z(\beta)$ vecinas para diferentes valores de δ también se mueve a valores mayores de β . Puede adquirirse la misma información a partir de la Fig. 7, donde $X = dZ / d\delta$, es decir, la dependencia de la dependencia de la temperatura del factor de escala Z sobre variaciones de la birrefringencia, se muestra frente a β para diferentes valores de δ . El punto en el que $X(\beta)$ cruza la línea de cero (intensividad a las variaciones en δ) se mueve a valores mayores de β .

Por lo tanto, el objetivo de este aspecto de la invención es enseñar un diseño de bobina detectora que, para un valor dado de δ , está caracterizado por un par de parámetros ρ (o ϵ) y β elegidos para conseguir simultáneamente $X = 0$ (es decir, la dependencia de la temperatura del factor de escala no se ve afectada por las variaciones en δ) y un valor preseleccionado de la dependencia de la temperatura del detector, en concreto como se da mediante la Ec. (9). Un algoritmo numérico permite encontrar los parámetros óptimos ϵ_{opt} (o ρ_{opt}) y β_{opt} para una cantidad dada (medida o calculada) de birrefringencia δ en la fibra detectora. La Fig. 8 muestra el ángulo azimutal óptimo β_{opt} frente al ángulo de fase inducido por birrefringencia δ para valores típicos, P y Q , de la dependencia de la temperatura de δ y ρ , respectivamente. En el gráfico de la Fig. 9, la tolerancia del ángulo azimutal $\Delta\beta$ se calcula de manera que debe observarse para que permanezca dentro de $\Delta Z < \pm 1 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ ($\Delta Z =$ variaciones de Z). Para pequeñas cantidades de birrefringencia la tolerancia para β es grande, pero para $\delta = 10^\circ$, el valor óptimo $\beta_{opt} = 11^\circ \pm 5^\circ$, que es significativamente diferente de $\beta = 0^\circ$, que sería el valor óptimo cuando se considera insignificante la dependencia de la temperatura de la birrefringencia. La Fig. 10 representa el término de retardo correspondiente ϵ_{opt} necesario para conseguir la compensación de la temperatura ($Z + 1/V \cdot \partial V/\partial T = 0$) al ángulo azimutal óptimo β_{opt} para el mismo conjunto de parámetros P y Q como en la Fig. 8. Los dos parámetros ϵ_{opt} y β_{opt} se han calculado simultáneamente con una hoja de Matlab de una manera numérica.

La Fig. 11 muestra el factor de escala global frente a la temperatura (línea continua) de un detector de temperatura compensada con un valor ϵ elegido de forma óptima (y, de esta manera, ρ) para un valor $\beta = 135^\circ$ pre-seleccionado, suponiendo una bobina no recocida de fibra con cuatro bobinados, un diámetro de fibra de $80 \mu m$, y un diámetro de la bobina de $15 cm$. El retardo δ es entonces de 18° a una longitud de onda de $1310 nm$. Para los parámetros dados, ϵ debe elegirse como $22,5^\circ$, para conseguir la compensación de la temperatura. La línea de puntos y rayas representa la variación normalizada de la constante de Verdet con temperatura y la línea de rayas muestra la variación en el término del factor de escala S que compensa el aumento en la constante de Verdet.

En el procedimiento como se ha descrito adicionalmente en lo anterior, el retardo ρ y el ángulo azimutal β se ajustan ambos a sus valores óptimos para un valor dado de δ . Como fundamento, es concebible establecer cualquiera de ρ o β a valores pre-determinados, y ajustar los otros dos parámetros respectivos a sus valores óptimos.

45 *Minimización de la dependencia de S respecto a δ*

En particular cuando se usan fibras no recocidas, la birrefringencia δ de la fibra detectora puede conocerse de forma más precisa. Por tanto, puede ser más ventajoso no minimizar la influencia de δ sobre Z , sino más bien su influencia sobre el factor de escala S , que se consigue si se satisface la siguiente condición

$$\frac{\partial S}{\partial \delta} = 0 \quad (11)$$

Como en el caso anterior, un ajuste preciso de la condición de la Ec. (11) no puede conseguirse debido a las tolerancias de fabricación y, por lo tanto, el error en (11) debería ser menor que un tercer valor umbral t_3 razonablemente pequeño, es decir

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < t_3 \quad (11')$$

Un tercer valor umbral t_3 típico, que da una buena independencia de la temperatura, pero que tiene en cuenta las

tolerancias de fabricación es 0,2 [rad⁻¹], en particular menor de 0,05 [rad⁻¹].

En este caso, el factor de escala de un dispositivo será linealmente independiente de la birrefringencia δ , por ejemplo en el caso de que δ deba cambiar con el tiempo.

5 Por tanto, en una segunda realización ventajosa de la invención, los valores de Q , β y ε (y, de esta manera, ρ) se eligen de manera que se satisfacen las condiciones de las Ecs. (11) y (9), lo que permite de nuevo deducir los valores óptimos ρ_{opt} y β_{opt} , de una manera similar a la del caso anterior.

10 *Minimización de la dependencia de Z o S respecto a β*

Cuando se fabrica el dispositivo, el valor del ángulo azimutal β puede variar entre dispositivos individuales debido a las tolerancias de fabricación. Por tanto, puede ser ventajoso minimizar la dependencia de Z o S respecto al valor de β , es decir

15
$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = 0 \quad \text{o} \quad (12a)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \beta} = 0. \quad (12b)$$

Como puede mostrarse para una cantidad insignificante de birrefringencia intrínseca presente en la fibra detectora, o si los ejes de la birrefringencia intrínseca e inducida por torsión coinciden, ambas condiciones se satisfacen si $\beta \bmod 90^\circ = 45^\circ$. Por tanto, en otra realización ventajosa más de la invención, β debería elegirse de manera que $\beta \bmod 90^\circ = 45^\circ$, eligiéndose entonces ε para satisfacer la Ec. (9). De nuevo, la condición (12a) o (12b) no puede ajustarse con precisión y, por lo tanto, una desviación del ángulo, tal como $\beta \bmod 90^\circ = 45^\circ \pm 5^\circ$ es tolerable.

Desplazamientos de fase de Faraday φ_F grandes

25 En las consideraciones anteriores se suponía que el desplazamiento de fase de Faraday φ_F es pequeño ($\varphi_F \ll 1$). La aproximación se mantiene bastante razonable dentro del intervalo ($\varphi_F = < 0,3$ rad, en particular $< 0,1$ rad, en muchas situaciones prácticas. Pueden encontrarse desplazamientos de fase significativamente mayores ($\varphi_F > 0,3$ rad), por ejemplo en la producción electrolítica de metales, por ejemplo en hornos de fundición de aluminio, donde deben medirse corrientes de hasta aproximadamente 500 kA. Aquí, el término $4\varphi_F$ puede alcanzar valores de hasta, por ejemplo, 2π . Como es obvio a partir de las ec. (3) - (6), el factor de escala S entonces no es solo una función de ε , δ , y β , sino que también depende de φ_F y, de esta manera, de la corriente. Esto se ilustra en la Fig. 12, que muestra el factor de escala S como una función de $4\varphi_F$ para tres retardos diferentes $\rho = \pi/2 + \varepsilon$ del retardador [2]. Para cada retardo el factor de escala se calcula para ángulos azimutales β de 45° , 90° y 135° . Un detector que se ha optimizado bajo la suposición de $\varphi_F \ll 1$ ya no puede optimizarse suficientemente para φ_F mayores, es decir, si la condición $\varphi_F \ll 1$ ya no es válida nunca más. Dadas las consideraciones anteriores, sin embargo es posible, aplicando las enseñanzas dadas anteriormente, determinar de nuevo un conjunto de parámetros ε , δ , β , y/o Q que optimizan el detector, en lugar de a $\varphi_F \ll 1$ en las proximidades de otro valor de $4\varphi_F$, por ejemplo a $4\varphi_F = \pi/2$ y la corriente correspondiente.

35 Nota: a desplazamientos de fase de Faraday mayores la dependencia de la temperatura Z del factor de escala $S = S(\varepsilon, \delta, \beta, \varphi_F)$ (ec. 8) incluye, implícitamente, una contribución de la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet mediante el término $\varphi_F = VNI$. Sin embargo, esta contribución a Z , por ejemplo, en (9), (9'), es insignificante comparado con la propia dependencia de la temperatura de la constante de Verdet $(1/V) \partial V / \partial T$.

Derivación de ecuaciones

45 La siguiente sección describe aproximaciones para las cantidades Z y X como se han definido anteriormente.

El término del factor de escala S , para pequeñas corrientes (es decir, $4\varphi_F \ll \pi$) puede expresarse como (de acuerdo con [2]):

50
$$S = \frac{\Delta\phi}{4\varphi_F} = \frac{1 + \frac{1}{3}\delta^2 + \frac{4}{3}\varphi_F^2}{\cos(\varepsilon) - \delta \sin(\varepsilon) \sin(2\beta) \left(1 + \frac{1}{3}\delta^2 + \frac{4}{3}\varphi_F^2\right)}, \quad (13)$$

con los parámetros φ_F , δ , β , y ρ como se han definido adicionalmente anteriormente.

- 5 Se supone que la fórmula para el factor de escala y su dependencia de la temperatura debería ser precisa a un nivel de $\Delta S/S=10^{-4}$. Para la medición de corriente en subestaciones de alta tensión, el desplazamiento de fase de Faraday medido normalmente es pequeño, es decir $\varphi_F < 0,05$ rad y la birrefringencia inducida por torsión también, es decir, $\delta < 20^\circ$ (-0,35 rad). La magnitud de ε normalmente es $\varepsilon < 12^\circ$ (-0,2 rad). Si solo se mantienen los términos principales la fórmula se simplifica:

$$S(\varepsilon, \delta, \beta) = \frac{\Delta\phi}{4\varphi_F} = \frac{M + \frac{1}{3}\delta^2}{\cos(\varepsilon) - g\delta\sin(\varepsilon)} \quad \text{con} \quad M = 1 + \frac{4}{3}\varphi_F^2 \quad \text{y} \quad g = \sin(2\beta). \quad (14)$$

- 10 La dependencia de la temperatura del factor de escala (excluyendo los cambios de la constante de Verdet)

$$Z = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T}$$

está gobernada por la dependencia de la temperatura de la birrefringencia δ en la fibra detectora de acuerdo con [3]

$$\frac{\partial \delta}{\partial T} = P \cdot \delta \quad \text{con} \quad P = 6 \cdot 10^{-4} [K^{-1}], \quad (15)$$

- 15 y la dependencia de la temperatura de ε de acuerdo con

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} = Q \cdot \rho \quad \text{con} \quad |Q| = (1 \dots 6) \cdot 10^{-4} [K^{-1}] \quad (16)$$

con Q una propiedad típica (medida) de la fibra del retardador. Los coeficientes P y Q son propiedades de las fibras empleadas y son $\neq 0$.

- 20 Esta dependencia de la temperatura del factor de escala Z se da entonces mediante:

$$Z = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{S} \left(\frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{\partial S}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial T} \right) = \frac{1}{S} \left(\frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \cdot Q\rho + \frac{\partial S}{\partial \delta} \cdot P\delta \right), \quad (17)$$

o en detalle:

- 25

$$Z = Q \left(\varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) \frac{\sin(\varepsilon) + g\delta \cos(\varepsilon)}{\cos(\varepsilon) - g\delta \sin(\varepsilon)} + P\delta \left(\frac{2\delta}{(3M + \delta^2)} + \frac{g\sin(\varepsilon)}{\cos(\varepsilon) - g\delta \sin(\varepsilon)} \right) \quad (18)$$

Para implementar la intensividad de Z contra pequeñas variaciones en la birrefringencia de la bobina detectora, es decir, para reducir el impacto de las tolerancias de fabricación, los parámetros de diseño del cabezal detector ε y β tienen que elegirse de manera que:

- 30

$$X(\varepsilon, \beta, \delta) = \frac{\partial Z}{\partial \delta} = 0 \quad (19)$$

o en detalle:

$$X = \frac{g(Q\rho + \frac{1}{2}P\sin(2\varepsilon))}{(\cos(\varepsilon) - g\delta \sin(\varepsilon))^2} + \frac{4P\delta}{(3M + \delta^2)} \left[1 - \frac{\delta^2}{(3M + \delta^2)} \right] \quad (20)$$

Para una cantidad dada de birrefringencia δ en la fibra detectora (a medir), los parámetros ϵ_{opt} y β_{opt} pueden calcularse numéricamente para satisfacer las condiciones de límite $Z(\epsilon, \beta) = Z_0$ y $X(\epsilon, \beta) = 0$, por ejemplo, con una hoja de Matlab.

5 **Notas**

Como se ha mencionado anteriormente, la fibra detectora 5 es ventajosamente una fibra recocida. En particular, puede residir en un capilar de vidrio recocido.

10 Como alternativa, la fibra detectora 5 puede ser una fibra no recocida, que de nuevo reside opcionalmente en un capilar. Preferentemente (aunque no necesariamente) la fibra no tiene un recubrimiento protector y el capilar está lleno de medios reductores de la fricción.

15 Aunque la descripción anterior se centra en un detector de corriente, las mismas técnicas pueden aplicarse a un detector de campo magnético. Para detectar un campo magnético la fibra no forma un bucle cerrado, sino que puede formar un bucle parcial o estar alineada a lo largo de una trayectoria recta. La señal del detector es proporcional entonces a la trayectoria integral $\int H \cdot ds$ a lo largo de la trayectoria que conecta los dos extremos de la fibra detectora.

20 El valor de $|Q|$ es típicamente entre $1 \cdot 10^{-4}$ y $6 \cdot 10^{-4} K^{-1}$.

Bibliografía

25 [1] K Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H Brandle, "Temperature and Vibration Insensitive Fiber-Optic Current Sensor", J. Lightwave Technol, 20(2), 267, (2002).
 [2] K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H., Brandle, M. Brunzel, "Fiber-Optic Current Sensor for Electrowinning of Metals", J. Lightwave Technol., 25(11), 3602, (2007).
 [3] Z.B. Ren, P. Robert, y P.A. Paratte, "temperature dependence of bend- and twist-induced birefringence in a low-birefringence fiber," Opt Lett. 13(1), 62, (1988)
 30 [4] H. Lefevre, "The Fiber-Optic Gyroscope", Artech House, Londres, 1993 y H. Lefevre, "fundamental of the Interferometric Fiber Optic Gyroscope", Proc. SPIE, 2837, pág. 2-17, (1996).

Números y símbolos de referencia

- 35 1: unidad de control
 2: fibra pm (fibra para mantener la polarización)
 3: cabezal detector
 4: retardador
 5: fibra detectora
 40 6: conductor
 7: reflector
- H*: campo magnético
I: corriente
 45 *L*: longitud del retardador
N: número de bucles de fibra detectora
P: dependencia de la temperatura del coeficiente de temperatura de δ
Q: dependencia de la temperatura o coeficiente de temperatura de ρ
S: término del factor de escala
 50 *T*: temperatura
U: véase la Ec. (4)
V: constante de Verdet de la fibra detectora
X: impacto de la variación de la birrefringencia
Z: derivada de temperatura normalizada de *S*
- 55 *n* dirección normal *v* o vector normal al plano de la bobina de fibra detectora
- β $45^\circ - \beta'$
 β' : ángulo azimutal del retardador
 60 δ : desplazamiento de fase inducido por birrefringencia en una fibra detectora
e: desplazamiento de fase adicional del retardador
p: desplazamiento de fase (total) del retardador

REIVINDICACIONES

1. Un detector de corriente o detector de campo magnético de fibra óptica, que comprende una fibra detectora (5) que se expondrá a un campo magnético de una corriente I a medir, en el que dicha fibra detectora (5) forma un bucle en un plano de la bobina detectora, y en el que dicha fibra detectora (5) tiene una constante de Verdet V , al menos un retardador (4) dispuesto entre una fibra para mantener la polarización (2) y dicha fibra detectora (5) para convertir la luz entre polarización lineal y elíptica, en el que un eje principal de dicha fibra para mantener la polarización (2) inmediatamente antes del retardador se hace girar con respecto a una normal de dicho plano de la bobina detectora en un ángulo β y en el que dicho retardador (4) introduce un retardo $\rho = \pi/2 + \varepsilon$ entre las ondas luminosas polarizadas a lo largo de sus ejes principales, siendo ε un desplazamiento de fase distinto de cero, adicional, y una unidad de control (1) adaptada para generar una señal proporcional a un desplazamiento de fase $\Delta\phi$, señal que es proporcional a $4 S (\varepsilon, \delta, \beta, \varphi_F) V \cdot N \cdot I = 4 S (\varepsilon, \delta, \rho, \varphi_F) \cdot \varphi_F$, en la que N es un número de bucles de dicha fibra detectora (5), δ es un desplazamiento de fase inducido por birrefringencia lineal de dicha fibra detectora (5), φ_F es un desplazamiento de fase de Faraday y S es un factor de escala, en el que una derivada normalizada de S con respecto a la temperatura T es

$$Z(\varepsilon(T), \delta(T), \beta, \varphi_F) = \frac{1}{S} \frac{\partial S(\varepsilon, \delta, \beta, \varphi_F)}{\partial T}$$

20 **caracterizado por que** β, ε y $Q = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ son tales que

$$\left| Z + \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \right| < t_1$$

se satisface sobre un intervalo de valores de φ_F y para un valor distinto de cero del desplazamiento de fase δ

$$p = \frac{1}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial T}$$

inducido por birrefringencia lineal y su dependencia de la temperatura dada T_0 , en particular en un centro de un intervalo de temperatura operativa del detector, siendo t_1 un primer valor umbral menor de $7 \cdot 10^{-5}$ 1/K, en particular menor de $2 \cdot 10^{-5}$ 1/K.

2. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 1, en el que Q, β y ε son tales que

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \delta} \right| < t_2,$$

30 siendo t_2 un segundo valor umbral menor de $2 \cdot 10^{-3}$ ($K^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$), en particular menor de $0,5 \cdot 10^{-3}$ ($K^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$).

3. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 1 en el que Q, β y ε son tales que

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < t_3,$$

35 siendo t_3 un tercer valor umbral menor de 0,2 [rad^{-1}], en particular menor de 0,05 [rad^{-1}].

4. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 1 en el que $\beta \text{ mod } 90^\circ = 45^\circ \pm 5^\circ$.

40 5. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 2, en el que Q, β y ε son tales que

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \delta} \right| < t_3,$$

45 siendo t_3 un tercer valor umbral menor de 0,2 [rad^{-1}], en particular menor de 0 05 [rad^{-1}].

6. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 2, en el que Q, β y ε son tales

que

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \beta} \right| < t_4,$$

siendo t_4 un cuarto valor umbral menor de 0,06 [rad⁻¹], en particular menor de 0,01 [rad⁻¹].

- 5 7. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 2, en el que Q, β y ε son tales que

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right| < t_5,$$

- 10 siendo t_5 un quinto valor umbral menor de 0,0005 [K⁻¹*rad⁻¹], en particular menor de 0,0001 [K⁻¹*rad⁻¹].

8. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 3, en el que Q, β y ε son tales que

$$\left| \frac{\partial S}{\partial \beta} \right| < t_4,$$

- 15 siendo t_4 un cuarto valor umbral menor de 0,06 [rad⁻¹], en particular menor de 0,01 [rad⁻¹].

9. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 3, en el que Q, β y ε son tales que

20

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right| < t_5,$$

siendo t_5 un quinto valor umbral menor de 0,0005 [K⁻¹*rad⁻¹], en particular menor de 0,0001 [K⁻¹*rad⁻¹].

- 25 10. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha fibra detectora (5) es una fibra recocida.

11. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de la reivindicación 10, en el que dicha fibra detectora recocida (5) reside en un capilar de vidrio recocido.

- 30 12. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que dicha fibra detectora (5) es una fibra no recocida.

13. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que dicha fibra detectora (5) es una fibra no recocida que reside en un capilar.

- 35 14. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho retardador (4) comprende una fibra para mantener la polarización adicional.

- 40 15. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho retardador (4) comprende una fibra de núcleo elíptico.

16. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que

$$Z = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{S} \left(\frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \cdot Q\rho + \frac{\partial S}{\partial \delta} \cdot P\delta \right)$$

- 45 con

$$\frac{\partial \delta}{\partial T} = P \cdot \delta \quad \text{y} \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} = Q \cdot \rho,$$

con coeficientes P y Q distintos de cero.

17. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que $|Q| = (1..6) 10^{-4} K^{-1}$.

5 18. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores para $\varphi_F < 0,3$ rad, particularmente $\varphi_F < 0,1$ rad.

19. El detector de corriente o de campo magnético de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones 1-17 para $\varphi_F > 0,3$ rad.

10

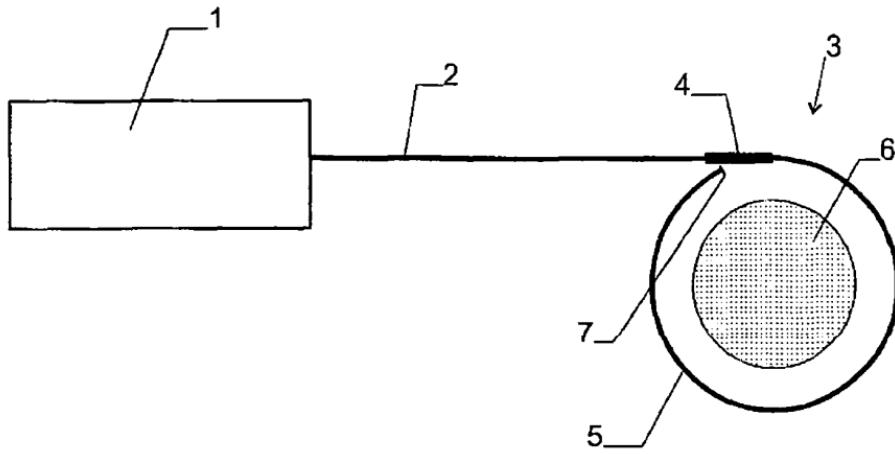


Fig. 1

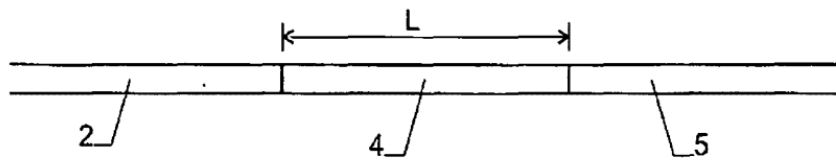


Fig. 2

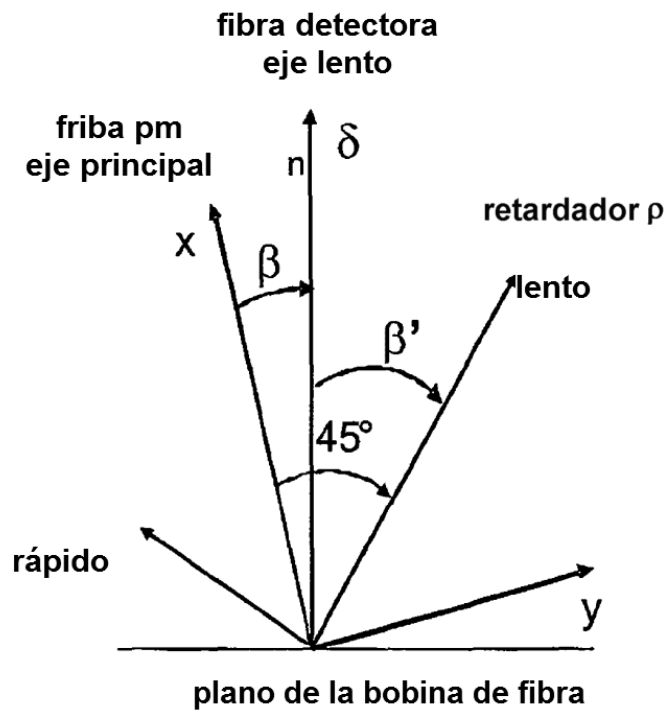


Fig. 3

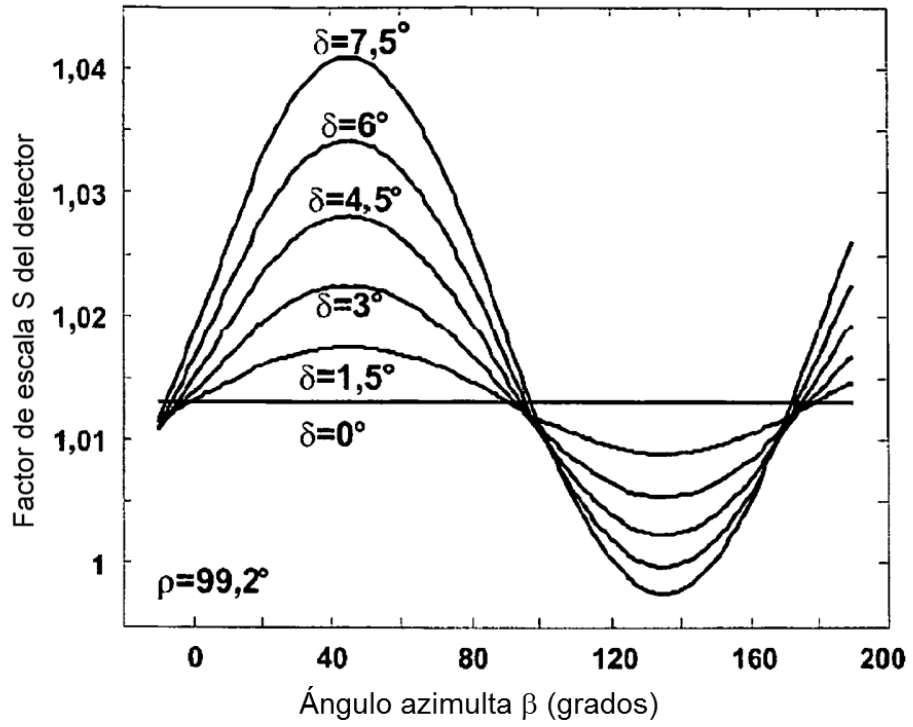


Fig. 4

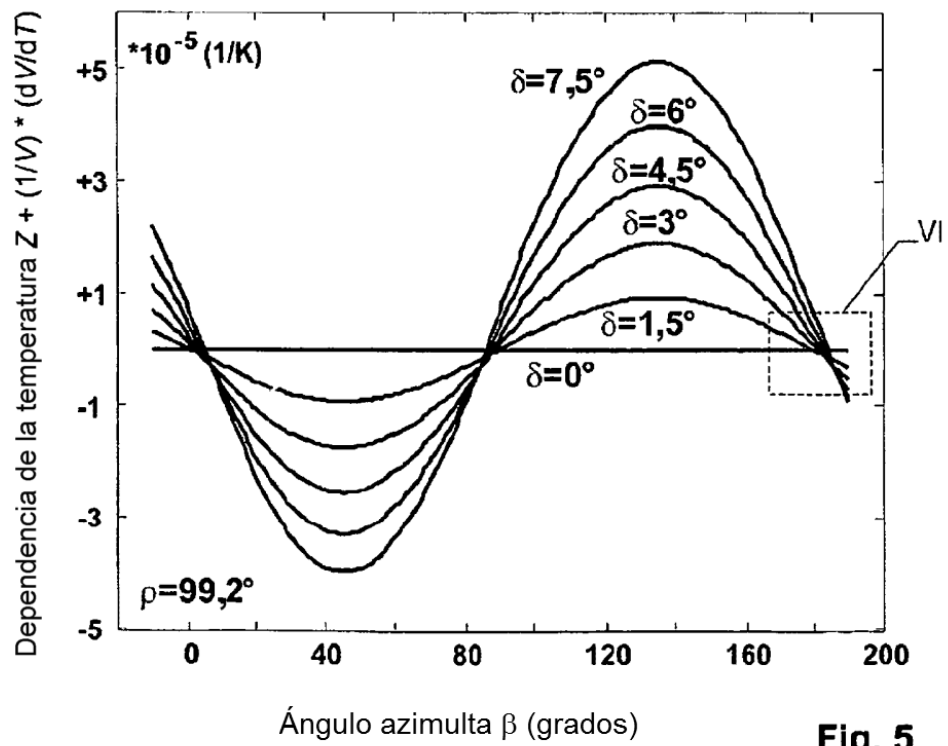


Fig. 5

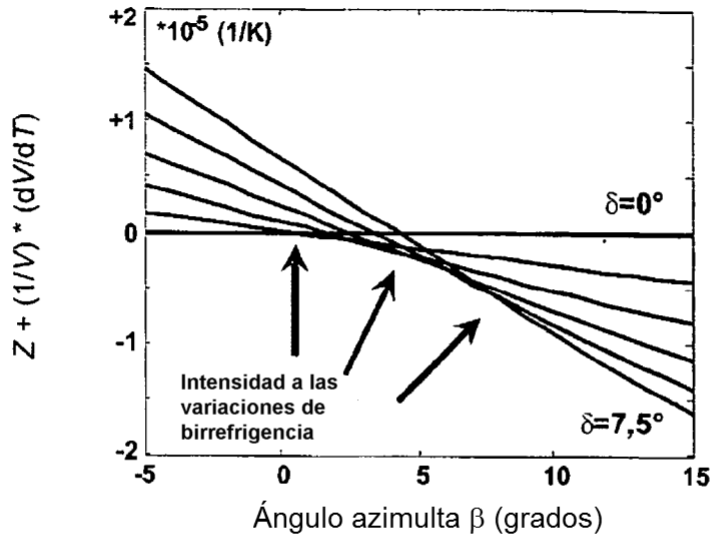


Fig. 6

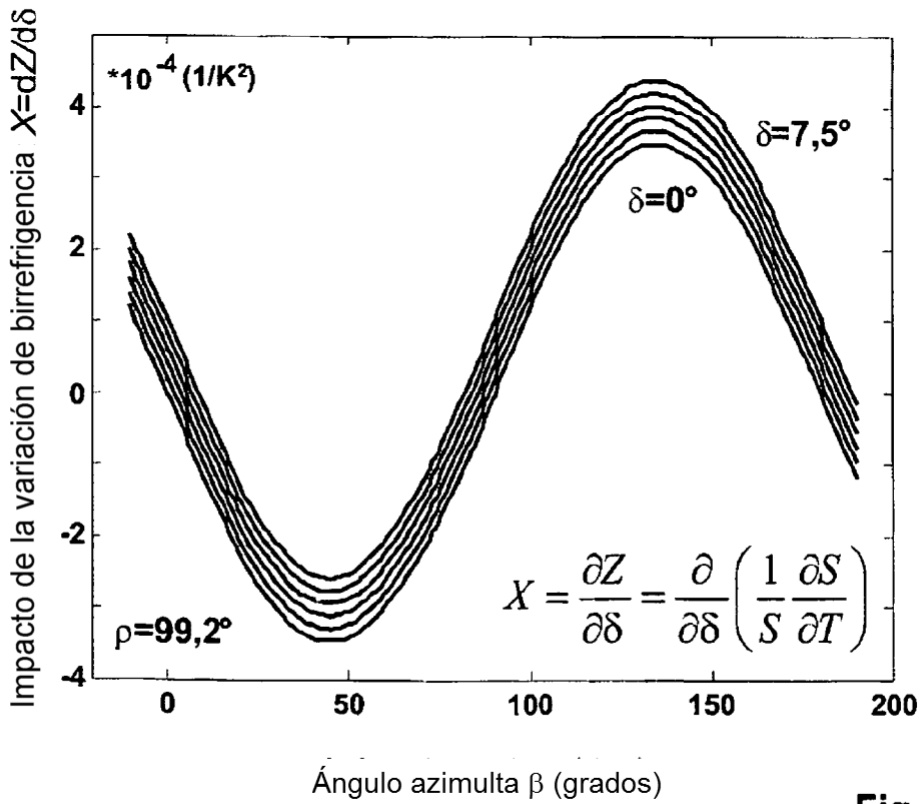


Fig. 7

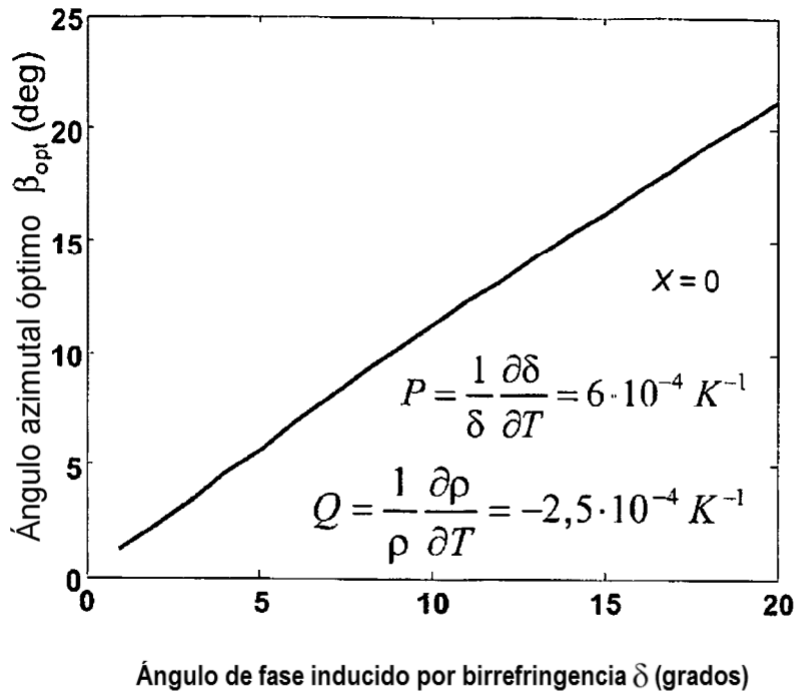


Fig. 8

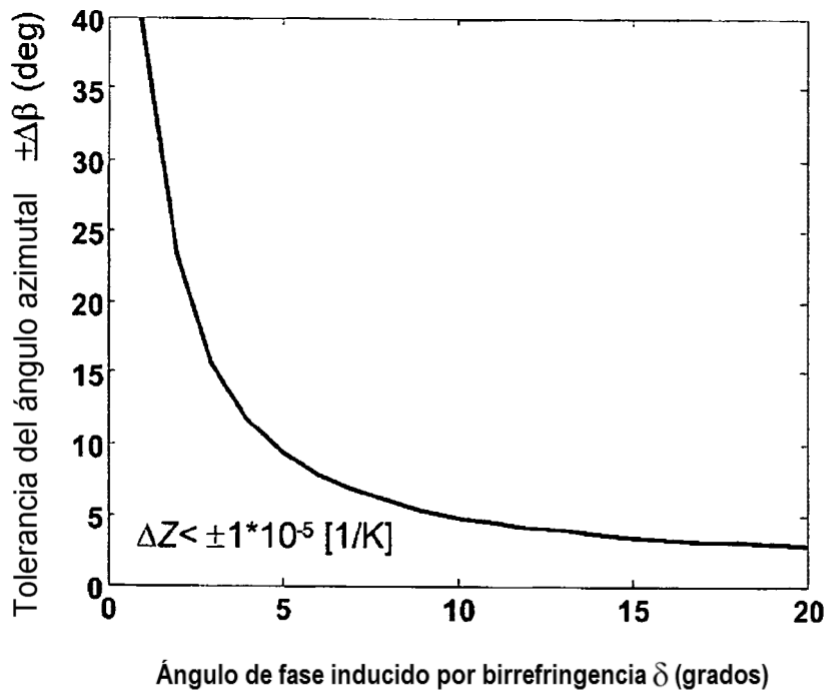


Fig. 9

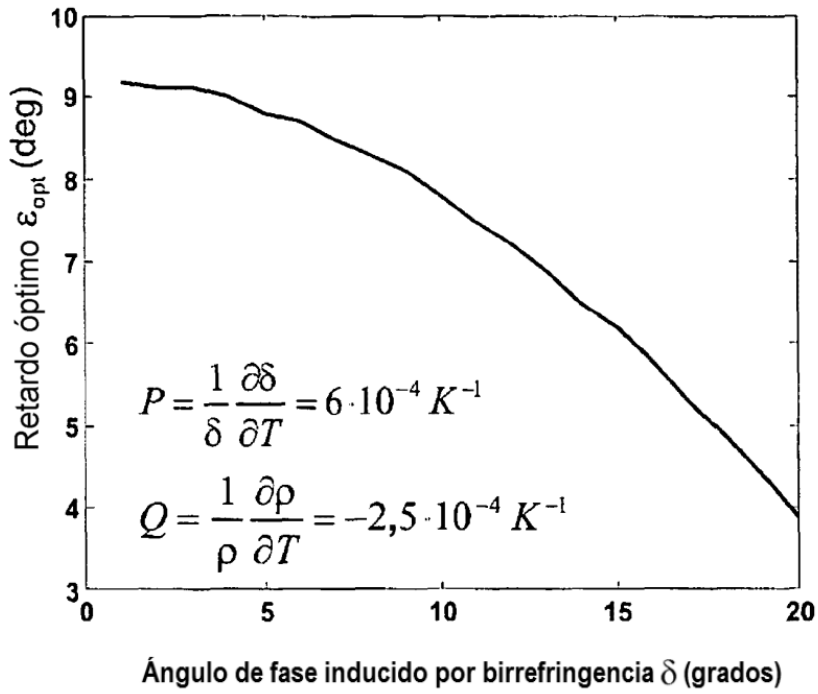


Fig. 10

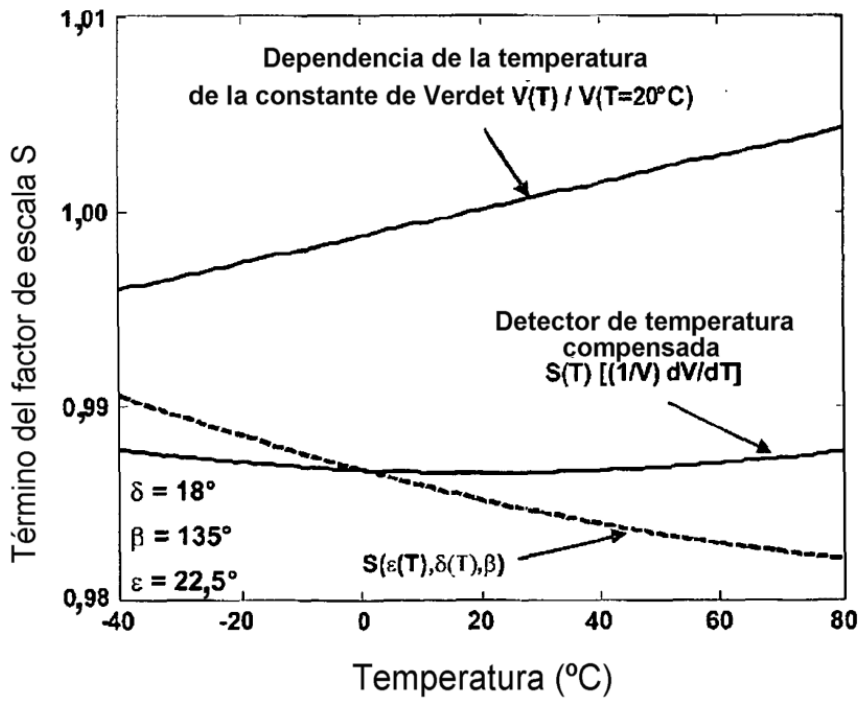


Fig. 11

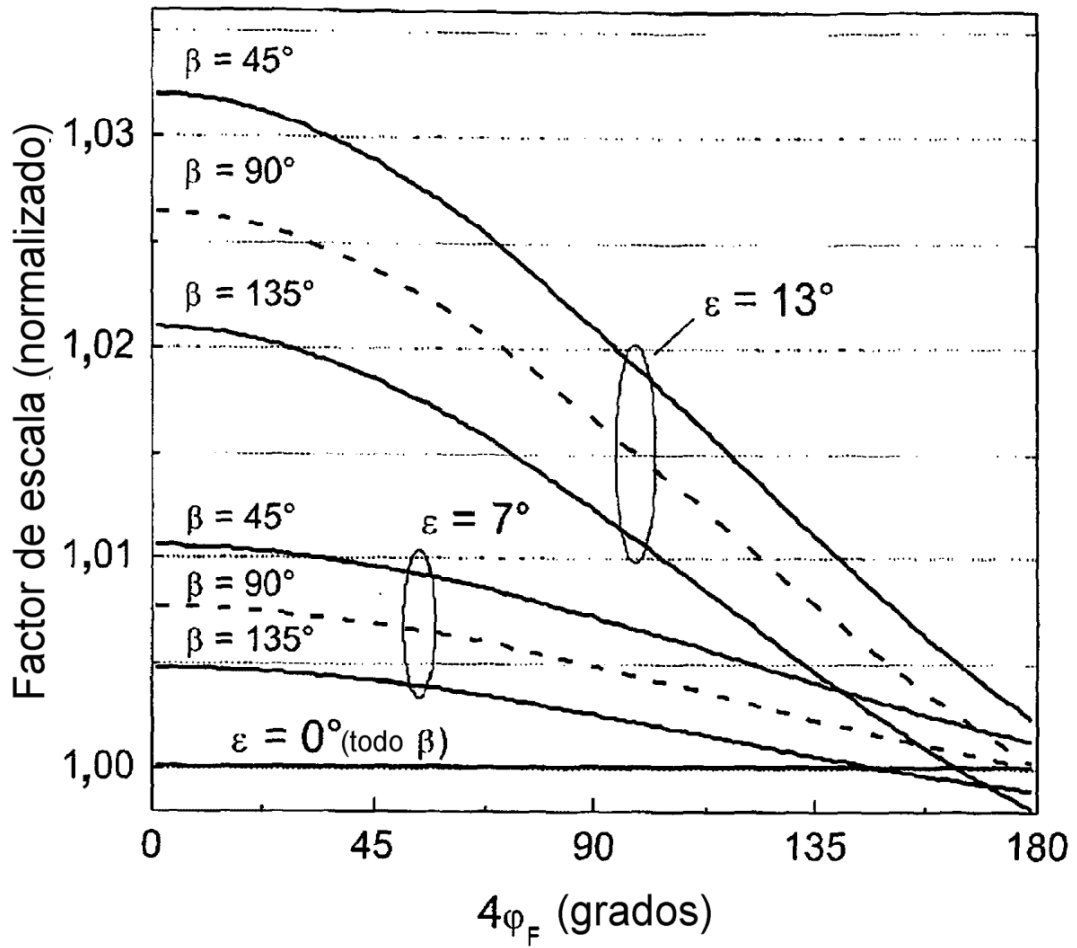


Fig. 12