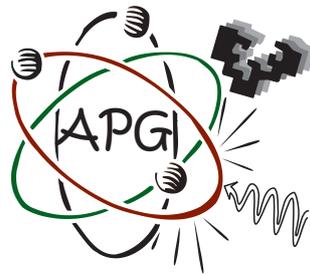


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
DE BILBAO**



Applied Photonics Group

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA
POLARIZACIÓN EN FOP MICROESTRUCTURADAS
PARA SU APLICACIÓN EN SENSADO ÓPICO**

OSKAR ARRIZABALAGA URIARTE

Directores del Proyecto

**GAIZKA DURANA APAOLAZA
JOSEBA ANDONI ZUBIA ZABALLA**

Índice general

1. Introducción	1
2. Algunas Propiedades Ópticas	5
2.1. Birrefringencia	5
2.1.1. Birrefringencia Lineal	6
2.1.2. Birrefringencia Circular	7
3. Objetivos	8
3.1. Objetivo Principal	8
3.2. Objetivos Parciales	8
3.2.1. Objetivos Técnicos	8
3.2.2. Objetivos Económicos	9
3.2.3. Objetivos Sociales	9
4. Estado del Arte	10
4.1. Sensores de Fibra Óptica	10
5. Beneficios del Proyecto	12
5.1. Beneficios	12
5.1.1. Beneficios Técnicos	12
5.1.2. Beneficios Económicos	12
5.1.3. Beneficios Sociales	13
6. Selección de Alternativas	14
6.1. Análisis de Alternativas	14
6.1.1. Montaje Experimental con Polarización Circular	14
6.1.2. Montaje Experimental con Polarización Lineal	16

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	2
6.2. Criterios de Selección	18
6.3. Selección de la Solución	19
7. Componentes del Sistema de Medidas	20
7.1. Componentes Ópticos	20
7.1.1. mPOF	20
7.1.2. Fuente de Luz	21
7.1.3. Telescopio Óptico	22
7.1.4. Espejos	26
7.1.5. Polarizadores	27
7.1.6. Objetivos de Microscopio	29
7.1.7. Sistema de Acoplamiento de Fibra	31
7.1.8. Abrazadera Rotatoria para Fibra	32
7.1.9. Medidor de Potencia	33
7.1.10. Polarímetro	35
7.1.11. Mesa Óptica	37
7.1.12. Aplicación de Computación	38
7.1.13. Otros Componentes	38
8. Diseño y Desarrollo del Trabajo	39
8.1. Sistemas de Medida	39
8.1.1. Diseño para el Cálculo de la Posición de los Ejes Ópticos	39
8.1.2. Diseño para Determinar la Longitud de Batido	40
8.1.3. Diseño para Estudiar el Efecto de la Curvatura en la mPOF	40
8.1.4. Diseño para Estudiar el Efecto de la Torsión en la mPOF	41
8.2. Desarrollo del Trabajo	44
8.2.1. Determinación de los Ejes Ópticos de la mPOF	44
8.2.2. Medida de la Longitud de Batido	46
8.2.3. Medidas para el Estudio del Efecto de la Curvatura en la mPOF	49
8.2.4. Medidas para el Estudio del Efecto de la Torsión en la mPOF	53
9. Medidas y Resultados	56
9.1. Resultados de la Determinación de los Ejes Ópticos	56
9.2. Resultados de la Medida de la Longitud de Batido	62
9.3. Resultados del Efecto de la Curvatura en la mPOF	63
9.4. Resultados del Efecto de la Torsión en la mPOF	64

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	3
10. Conclusiones Finales	67
Anexos	68
A. Determinación de los Ejes Ópticos	69
A.1. Análisis Matemático	69
B. Birrefringencia	76
B.1. Análisis de la Birrefringencia Lineal en una Fibra	76
B.2. Análisis de la Birrefringencia Circular en una Fibra	79
C. Contribuciones a Congresos	81
D. Plan de Trabajo	83
D.1. Grupo de Trabajo	83
D.2. Definición de Paquetes de Trabajo y Tareas	84
D.3. Hitos de Control	89
D.3.1. Descripción de los Hitos de Control	89
D.4. Unidades Entregables	90
D.5. Gantt de Actividades	90
D.6. Asignación de Recursos Humanos	92
E. Coste del Proyecto	93
E.1. Financiación	93
E.2. Presupuesto de Recursos Humanos	93
E.3. Presupuesto de Recursos Materiales	94
E.3.1. Material Fungible	94
E.3.2. Material Amortizable	94
E.4. Resumen Final del Coste del Proyecto	97

Índice de figuras

1.1. mPOF	3
6.1. Montaje experimental con polarización circular	14
6.2. Sistema de coordenadas	15
6.3. Método experimental con polarización lineal	17
7.1. Láser He-Ne	21
7.2. Especificaciones de la lente cóncava-convexa	23
7.3. Especificaciones de la lente biconvexa	24
7.4. Lentes del telescopio óptico	25
7.5. Soporte del telescopio óptico	26
7.6. Sistema de fijación del espejo	26
7.7. Sistema de control del ángulo de polarización lineal	27
7.8. Acoplamiento de la luz en la mPOF	29
7.9. Sistema de acoplamiento de la fibra	31
7.10. Abrazadera Rotatoria de Fibra.	32
7.11. Medidor de potencia y fotodetector	33
7.12. Polarímetro	35
7.13. Interfaz del software del polarímetro	36
7.14. Mesa óptica	37
7.15. Piezas mecanizadas para realizar medidas de curvatura (a) y longitud de batido (b) y (c)	38
8.1. Montaje experimental para calcular la posición de los ejes ópticos.	40
8.2. Montaje experimental para medir la longitud de batido	41
8.3. Diseño para estudiar el efecto de la curvatura en la mPOF	42
8.4. Diseño para estudiar el efecto de la torsión en la mPOF	43

8.5. Método experimental para la determinación de los ejes ópticos. FD fotodetector.	45
8.6. Transformación periódica del estado de polarización con la longitud de batido	48
8.7. Procedimiento para medir la longitud de batido de la fibra	48
8.8. Relación geométrica de la fibra sometida a curvatura causando birrefringencia lineal	49
8.9. Ilustración geométrica del cálculo del desfase causado por curvatura.	51
8.10. Representación de la elipse de polarización basada en datos aportados por el manual técnico del polarímetro.	52
8.11. Sección de fibra con longitud l_f expuesta a torsión con ángulo δ .	54
8.12. Sistema de rotación de la fibra.	55
9.1. Polarización de la luz a la salida de la fibra. Medida 1.	57
9.2. Polarización de la luz una vez corregido el ángulo θ . Medida 1.	57
9.3. Polarización de la luz a la salida de la fibra. Medida 2.	58
9.4. Polarización de la luz una vez corregido el ángulo θ . Medida 2. .	59
9.5. Polarización de la luz a la salida de la fibra. Medida 3.	60
9.6. Polarización de la luz una vez corregido el ángulo θ . Medida 3. .	61
9.7. Variación del azimut y la elipticidad a lo largo de la longitud de batido.	62
9.8. Evolución de la polarización a lo largo de una longitud de batido.	63
9.9. Resultados de las medidas de birrefringencia inducida por curvatura.	64
9.10. Torsión contra ángulo de salida de la polarización para una longitud de fibra de 90cm. Tres medidas con barras de error.	65
9.11. Torsión contra ángulo de salida de la polarización para una longitud de fibra de 47cm. Tres medidas con barras de error.	65
9.12. Comparativa de torsión contra ángulo de salida de la polarización, entre longitudes de 90 y 47 cm.	66
A.1. Disposición geométrica de las variables para el cálculo de los ejes ópticos, cuando el semieje mayor de la elipse está alineado con el eje lento de la lámina $\lambda/4$	70
A.2. Ilustración del parámetro de la elipticidad α	71
A.3. Definición de las variables para el cálculo de los ejes ópticos, cuando el semieje mayor de la elipse está alineado con el eje rápido de la lámina $\lambda/4$	72

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	6
B.1. Cambio de la polarización de la luz, al atravesar una fibra con birrefringencia lineal.	76
B.2. Vectores b_1 y b_2 de la elipse de polarización	78
B.3.	79
D.1. Gantt de actividades.	91

Índice de tablas

6.1. Criterios de selección del montaje experimental	19
7.1. Características de la mPOF	21
7.2. Especificaciones láser He-Ne	22
7.3. Especificaciones de la lente cóncava-plana	23
7.4. Especificaciones de la lente biconvexa	24
7.5. Especificaciones del espejo	27
7.6. Especificaciones del polarizador	28
7.7. Especificaciones del motor rotatorio	28
7.8. Especificaciones del objetivo de microscopio de entrada a la mPOF	30
7.9. Especificaciones de la plataforma multiejes	32
7.10. Especificaciones de la abrazadera rotatoria.	33
7.11. Especificaciones del medidor de potencia.	34
7.12. Especificaciones del fotodetector.	34
7.13. Especificaciones del polarímetro	36
7.14. Especificaciones de la mesa óptica	37
D.1. Matriz de responsabilidades. 1:Decide; 2:Ejecuta; 3:Asesora; 4:Es informado.	84
D.2. Paquete de trabajo 1. Preparación previa.	85
D.3. Paquete de trabajo 2. Realización del montaje experimental. . .	86
D.4. Paquete de trabajo 3. Determinación de los ejes ópticos de la mPOF.	87
D.5. Paquete de trabajo 4. Caracterización de la mPOF.	88
D.6. Paquete de trabajo 5. Análisis y conclusiones.	89
D.7. Hitos de control.	89
D.8. Unidades entregables.	90

ÍNDICE DE TABLAS 8

D.9. Asignación de recursos humanos.	92
E.1. Precio unitario por mano de obra	93
E.2. Presupuesto de recursos humanos	94
E.3. Precio unitario del material fungible.	94
E.4. Precio unitario del material amortizable.	95
E.5. Coste de los recursos materiales.	96
E.6. Resumen final del coste del proyecto	97

Bibliografía

- [1] Collet, Edwards. Polarized Light in Fibers Optics and Index. 2003 by The Polar wave Group ISBN 0-9677167-1-3.
- [2] Gowind P. Agrawal. LIGHT WAVE TECHNOLOGY Components and Devices. EE.UU 2004 ISBN 0-471-21573-2.
- [3] OPTICS. Eugene Hecht.(2001).
- [4] Alexander Argyros. Microstructures in Polymer Fibres for Optical Fibres, THz Waveguides, and Fibre-Based Metamaterials.(2012).
- [5] M.C. Farries and D.N. Payne, Appl. Phys. Lett. 55,25 (1989).
- [6] K.J. Blow, N.J. Doran, B.K. Nayar, and B.P. Nelson, Opt. Lett. 15, 248 (1990).
- [7] M. Jinno and T. Matsumoto, IEEE Photon, Technol. Lett.2. 349 (1990); Electron. Lett. 27, 75(1991).
- [8] H. Avramopoulos, P.M.W. French, M.C. Gabriel, H.H. Houh, N.A. Whitaker, and T. Morse, IEEE Photon, Technol. Lett. 3, 235 (1991).
- [9] J.D. Moores, K. Bergman, H.A. Haus, and E.P. Ippen. Opt. Lett. 16, 138 (1991); J. Opt. Soc. Am. B 8, 594 (1991).
- [10] M. Jinno, J. Lightwave technol. 10, 1167(1992); Opt. Lett. 18, 1409 (1993).
- [11] H Bülow and G.Veith, Electron. Lett. 29, 588 (1993).
- [12] P.A. Andrekson, N.A. Olsson, J.R. Simpson, T. Tanbun-Ek, R.A. Logan, and M. Haner, Electron. Lett. 27, 695 (1991).

- [13] T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi, T. Kitoh, and M. Saruwatari, *Electron. Lett.* 32, 832. (1996).
- [14] J. Hansryd and P.A. Andrekson, *IEEE Photon. Technol. Lett* 13, 732 (2001).
- [15] J.P. Agrawal, *Appl. Phys. Lett.* 51, 302 (1987); *J. Opt. Soc. Am.* B5, 149 (1988).
- [16] M.Kondo, Y. Ohta, M. Fujiwara, and M. Sakaguchi, *IEEE J. Quantum Electron.* 18, 1759(1982).
- [17] Z B Ren, Ph Robert and P-A Paratte. Linear birrefringence measurement in single mode fibre with circularly polarised input lighth. Switzerland 1985.
- [18] A.M Smith Automated birrefringence measurement system. U.K 1979
- [19] Jones (1941) R C 1941 A new calculus for the treatment of optical system
- [20] Longhurst R S 1967 Geometrical and Physical Optics 2nd edn (London: Longman)
- [21] Huards (1997) Polarization of lighth, Jonh Wiley & Sons, ISBN 2-225-85327-X, Paris.
- [22] Ulrich, R, Rashleigh, S.C. & Eickhoff, (1980) Bending-induced birefringence in singlemode fibers. *Optical Letters*, Vol. 5, No. 5, pp. (273 – 275), ISSN 1539-4794
- [23] Saleh, B. A. & Teich, M. C. (1991). *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, ISBN 978-0471839651, New York
- [24] Iizuka, K. (2002). *Elements of Photonics, Volume II*, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-83938-8, Toronto
- [25] www.thorlabs.com
- [26] www.newport.com
- [27] www.wolfram.com
- [28] <http://www.laser-optics-berlin.de/en/>
- [29] <http://www.teisa.unican.es/ofs23/>

BIBLIOGRAFÍA

11

[30] <http://pof2014.org/>

[31] <http://appliedphotonicsbilbao.org/>

Capítulo 1

Introducción

Muchos de los avances en nuestra tecnología se han originado a raíz del entendimiento de las propiedades de los materiales, en las últimas décadas se ha abierto una nueva frontera en el campo de la investigación, siendo su objetivo controlar las propiedades ópticas de los materiales. Una amplia variedad de desarrollos tecnológicos serían posibles si pudiéramos diseñar materiales que respondan a la luz en un rango de frecuencias deseado, reflejándose perfectamente, permitiendo que se propaguen solo en ciertas direcciones, o confinándolas en un volumen específico.

Actualmente la fibra óptica, con la simple propiedad de guiar la luz, ha revolucionado la industria de las telecomunicaciones. La ingeniería láser, la computación de alta velocidad y la espectroscopia son sólo uno de los pocos campos, de los muchos que existen, en la carrera a seguir por conseguir los beneficios y ventajas de los materiales ópticos.

Un cristal es una distribución periódica de átomos o moléculas, el patrón con la que estos átomos o moléculas están repetidos en el espacio es la red del cristal. Este representa un potencial periódico a la propagación de electrones a través de él, y la constitución del cristal y geometría de la red determinan las propiedades de conducción del cristal.

La teoría de la mecánica cuántica en un potencial periódico, explica que los electrones se propagan como ondas, y las ondas que cumplen ciertos criterios, pueden viajar a través de potenciales periódicos sin sufrir dispersión (aunque pueden ser dispersadas por defectos o impurezas).

Es importante saber que la red puede prohibir también la propagación de

ciertas ondas, puede haber *gaps*¹ de energía en la estructura de bandas de cristal, esto significa que habrá electrones que no podrán propagarse a través de éste a determinadas energías en ciertas direcciones, es decir, en *gaps* de energía prohibidos, el *gap* puede cubrir todas direcciones de propagación posibles, este hecho genera un *gap* completo en la estructura de bandas.

La analogía óptica de lo explicado anteriormente es el cristal fotónico, en el cual los átomos y las moléculas son reemplazados por medios microscópicos de diferente constante dieléctrica. Las propiedades de los cristales fotónicos estudiadas hasta la fecha son numerosas debido a su enorme potencial para manipular la luz.

Las propiedades ópticas de los cristales fotónicos nos han llevado a la fabricación de un nuevo tipo de fibras ópticas denominadas fibras de cristal fotónico [5]-[16], también llamadas fibras ópticas microestructuradas (FCF). Estas fibras, en su concepción original, se caracterizan por tener una estructura de agujeros de aire paralelos al eje envolviendo una zona central sólida que constituye el núcleo. Aunque están fabricadas únicamente con sílice, la presencia de los agujeros de aire en la cubierta forma una estructura dieléctrica periódica que permite el guiado de la luz. La propagación de los fotones en los cristales fotónicos tiene un comportamiento similar a la dinámica de los electrones en un semiconductor. Esto significa que los cristales fotónicos poseen bandas de propagación permitidas y bandas prohibidas que dependen de la longitud de onda de la luz, y por lo tanto, la red periódica de agujeros de aire en la cubierta de la fibra impide que la luz de cierta longitud de onda escape de su núcleo. La estructura de agujeros ofrece muchos grados de libertad en su diseño que se traducen en una gran versatilidad a la hora de buscar propiedades que no están presentes en las fibras convencionales, son de destacar, la propagación monomodo para longitudes de onda cortas y a su vez independiente del área del núcleo dando lugar a fibras de área modal grande, también sus propiedades para configurar la dispersión anómala o plana y por último los efectos no lineales.

Todo ello las hace adecuadas para aplicaciones dirigidas a la generación de supercontinuo, fabricación de láseres de alta potencia y sensores ópticos de gran precisión.

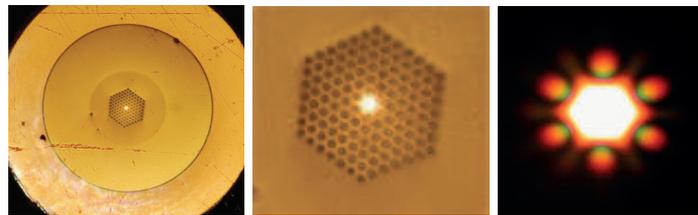
La mayor parte de las fibras micro-estructuradas están compuestas por un material cristalino, normalmente silicio, pero existe un creciente interés en fabricarlas con polímeros POFs.

Se llevan investigando los polímeros como plataforma para la fabricación de

¹Diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción

fibras microestructuradas (MOFs) desde el año 2001. En el contexto de fibras de cristal fotónico (PCF), las investigaciones habían comenzado cinco años antes. El interés del uso de polímeros surgió por la diferencia de propiedades materiales entre polímeros y sílices y las posibilidades que ello conlleva en los métodos de fabricación, el diseño de la fibra y las propiedades ópticas. Esto las hace potencialmente interesantes en multitud de aplicaciones.

Generalmente, el polímero que se utiliza para la fabricación de las mPOFs es el polimetilmetacrilato (PMMA) para el conjunto núcleo - revestimiento y policarbonato para el recubrimiento, Figura 1.1 (a) en el proceso de fabricación se realiza una distribución regular de agujeros, que se extiende a lo largo de toda la longitud. Esta distribución periódica está rota por la ausencia de uno de los agujeros, lo que conlleva a la aparición de un defecto. La región que proporciona el defecto actúa como núcleo de la fibra, mientras que la estructura periódica que la rodea actúa de revestimiento que opera como un cristal fotónico bidimensional, así pues, es posible confinar y guiar la luz por la zona del defecto [4], Figura 1.1 (b) cuya propagación transversal está inhibida por la estructura periódica envolvente.



(a) Estructura mPOF (b) Confinamiento de la luz en el núcleo (c) Proyección de la salida de la luz

Figura 1.1: mPOF

Aunque las POFs ofrecen significativas ventajas tales como su ligereza, gran flexibilidad en curvaturas, diámetro largo o inmunidad electromagnética a las interferencias para aplicaciones de sensado, en ellas, no han sido suficientemente explotadas sus propiedades del estado de polarización de la luz y su alta sensibilidad a cualquier perturbación. Las POFs microestructuradas (mPOFs) hacen que sea posible tener un control sobre la polarización de la luz con fines en sensado, como por ejemplo, determinar presión o estrés mecánico.

Industrias como la metalúrgica, la medicina o la aero-espacial, por citar algunos de los más importantes, son campos que están pendientes de nuevas inves-

tigaciones con la finalidad llegar a alcanzar nuevos retos tecnológicos así como mejorar sus eficiencias laborales. Cabe destacar que la fabricación de sensores basados en mPOFs permite medir parámetros con gran precisión, en dispositivos pequeños, fácilmente transportables, utilizables en cualquier entorno, y con un bajo coste económico.

En este proyecto se presenta un estudio teórico y experimental de la polarización de la luz en mPOFs cuando estas son sometidas a diferentes perturbaciones, para su aplicación en sensado óptico.

Hasta el momento de la finalización de la redacción de éste estudio, han nacido varias contribuciones a congresos internacionales. Dichas contribuciones, se enumeran en el Anexo C.

El Trabajo está financiado por el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y llevado a cabo por el Grupo de Fotónica Aplicada (APG) dirigido por el catedrático Joseba Andoni Zubía Zaballa.

Capítulo 2

Algunas Propiedades Ópticas

Uno de los objetivos de este proyecto ha sido determinar el valor de una propiedad óptica, denominada birrefringencia, en la mPOF. En este capítulo, se va a explicar este fenómeno.

2.1. Birrefringencia

La interacción entre los electrones del medio y la luz supone un cambio en la velocidad de transmisión. Los electrones se comportan como resonadores y, cuando están distribuidos aleatoriamente en el medio, como en el caso de cuerpos isotrópicos, la luz va a ser transmitida a la misma velocidad en todas las direcciones. Si la estructura molecular del medio es tal que la vibración de los electrones tiene vibraciones preferentes, tal como ocurre en los cuerpos anisotrópicos, la velocidad de la transmisión de la vibración luminosa será diferente en función de la polarización de la luz. Por tanto, para una longitud de onda dada, el medio podrá tener más de un índice de refracción. Tales materiales, se llaman birrefringentes.

Se llama birrefringencia Δn a la diferencia entre los índices de refracción ordinario (n_o) y extraordinario (n_e) en un mismo material, lo que se traduce en una diferencia de velocidades de los haces de luz al viajar por el interior de estos materiales [3].

$$\Delta n = n_e - n_o$$
$$v_e \neq v_o$$

Esta propiedad se da en materiales anisótropos, donde las propiedades físicas como el índice de refracción o el eje de polarización varían con la dirección.

Un haz de luz que atraviesa un material birrefringente se puede considerar dividido en un haz ordinario, polarizado en una dirección perpendicular al eje óptico, y en uno extraordinario, polarizado paralelamente al eje óptico, debido a la diferente velocidad a la que viajan dentro del material y, por consiguiente, se produce una diferencia de fase entre ellos. Esta diferencia de fase depende del espesor del material y de la birrefringencia. Los polímeros poseen esta propiedad, y la birrefringencia es característica de cada material, lo que permite identificarlos.

Existen diferentes tipos de birrefringencia que pueden darse en el interior de un material, pero los fenómenos más habituales en fibras ópticas son la birrefringencia lineal y la birrefringencia circular.

2.1.1. Birrefringencia Lineal

La birrefringencia lineal es el fenómeno por el cual, la velocidad de fase de un haz de luz linealmente polarizado en el interior de un medio, depende de la dirección de polarización respecto de los dos ejes ópticos, ortogonales entre sí, del material. Si un haz de luz linealmente polarizado, es lanzado paralelo a cualquiera de los ejes ópticos, éste permanecerá linealmente polarizado, pero lo más habitual es que este caso no se dé, por lo tanto, dicho haz de luz emergerá con polarización elíptica. El grado de elipticidad dependerá del ángulo de polarización a la entrada de la fibra y la magnitud de la birrefringencia lineal.

Láminas Retardadoras

Si sobre una placa birrefringente, la luz incide perpendicular a su cara cristalina y a su eje óptico, los dos rayos se propagarán en la misma dirección pero con velocidades diferentes y emergerán con una diferencia de fase δ , que dependerá del espesor de la placa d y de la longitud de onda de la luz incidente λ :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d \quad (2.1)$$

Siendo Δn la diferencia de los índices de refracción para el rayo ordinario y extraordinario.

Se fabrican láminas retardadoras para provocar un desfase fijo entre las componentes ordinaria y extraordinaria del campo, pudiéndose modificar el estado de polarización del haz emergente con respecto al incidente. Las más habituales son las láminas de cuarto de onda $\lambda/4$, que introducen una diferencia de fase de un cuarto de ciclo, $\pi/4$ y las láminas de media onda, $\lambda/2$ que introducen un desfase de medio ciclo, $\pi/2$.

2.1.2. Birrefringencia Circular

Birrefringencia circular, es el fenómeno por el cual, las velocidades de fase para las polarizaciones circulares ortogonales, son diferentes. El efecto de esta propiedad, es que una luz, linealmente polarizada, permanece linealmente polarizada en el interior del medio, pero la dirección de polarización rota sobre la dirección de propagación.

Capítulo 3

Objetivos

3.1. Objetivo Principal

Este proyecto pretende aportar un estudio teórico y experimental de la polarización de la luz en mPOFs para el desarrollo y fabricación de nuevos dispositivos de sensado, basados en un parámetro físico tan sensible a mínimas perturbaciones como es la polarización de la luz.

3.2. Objetivos Parciales

Para conseguir el objetivo principal, se han alcanzado los objetivos parciales descritos a continuación.

3.2.1. Objetivos Técnicos

- Diseñar un método matemático y experimental para determinar la posición del campo eléctrico de un haz de luz, respecto del eje óptico lento de la mPOF.
- Diseñar un método experimental y medir la longitud de batido ¹ de la mPOF.
- Determinar el valor de la birrefringencia óptica de la mPOF.

¹ Longitud de la fibra en la que el cambio de fase debido a la birrefringencia es de 2π .

- Estudiar el efecto de la curvatura en la mPOF.
- Estudiar el efecto de la torsión en la mPOF.
- Dado que, a día de hoy, no existen estudios de la polarización en fibras microestructuradas (mPOFs), ser pioneros en realizar una completa caracterización de la polarización en éstas fibras, y sentar las bases científicas necesarias para proseguir en una segunda fase de trabajo, que consista en desarrollar un dispositivo de sensado, basado en la tecnología resultante de dicho estudio.

3.2.2. Objetivos Económicos

- Aportar un nuevo material (polímero), con un proceso de fabricación más económico que las fibras ópticas convencionales, para la fabricación de sensores ópticos.
- Abaratar en la fabricación de dispositivos de sensado óptico al fabricarse con un material notablemente más económico.

3.2.3. Objetivos Sociales

- Ser pioneros en el estudio de la polarización de la luz en mPOFs.
- Ser admitidos en congresos internacionales sobre sensado óptico, y mPOF.

Capítulo 4

Estado del Arte

4.1. Sensores de Fibra Óptica

Los sensores de fibra óptica constituyen un campo de investigación muy antiguo. De hecho, gran parte de la investigación en fotónica se ha centrado en las áreas de instrumentación y sensores, y múltiples desarrollos de la industria optoelectrónica surgieron precisamente para aplicaciones de sensores. La reducción en las pérdidas de la fibra, así como las mejoras de calidad, sensibilidad y margen dinámico de los sensores de fibra, los ha convertido en sustitutivos ideales de los sensores tradicionales utilizados en medidas de rotación, aceleración, campos eléctricos y magnéticos, temperatura, presión, vibración acústica, posición, presión, humedad, sustancias químicas, etc. Sus principales ventajas radican en que se trata de técnicas de medida que requieren de un espacio mínimo, suelen ser no invasivas y se controlan de forma remota, trabajan en entornos hostiles, y los dispositivos son de bajo peso y son inmunes a las interferencias electromagnéticas.

En los sensores de fibra óptica la información del parámetro a medir viene determinada por un cambio en la fase, la polarización, la frecuencia o la intensidad de la señal óptica (así como cualquier combinación de ellas). Los sensores que detectan cambios en la intensidad de la señal son muy sencillos. En cambio, aquellos que trabajan con la fase, la polarización o la modulación de frecuencia son más complejos, pues la señal debe ser procesada previamente dado que el fotorreceptor solamente detecta potencia óptica. En estos casos se emplean estructuras interferométricas del tipo Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot o

Sagnac, que a su vez proporcionan una alta sensibilidad. Más recientemente, se están utilizando también redes de Bragg como sensores para medidas espectrales o discriminación de longitudes de onda.

Básicamente, los sensores de fibra pueden clasificarse en dos categorías, aquellos en los que la fibra óptica se utiliza solamente como medio para guiar la luz desde el emisor hasta el elemento sensor, y desde éste último hasta el fotodetector (llamados extrínsecos), o bien, aquellos en los que la propia fibra se utiliza como elemento sensor y de referencia (llamados intrínsecos). Las diferentes configuraciones propuestas hasta la fecha son innumerables.

Entre las estructuras interferométricas, la más típica es el interferómetro Mach-Zehnder. Su aplicación como sensor funciona de la siguiente manera, una fuente óptica coherente genera una señal que se divide en dos caminos por medio de un acoplador direccional de 3 dB. Uno de los caminos es el de referencia, mientras que en el otro existe un transductor que convierte determinado parámetro físico de medida en un cambio de fase de la señal óptica. Posteriormente, ambas señales se combinan de nuevo en un acoplador de salida, obteniéndose dos señales (suma y diferencia) que serán recibidas por sendos fotodetectores. De este modo, los cambios de fase de la señal óptica de una de las ramas del interferómetro pueden medirse a partir de las potencias ópticas en ambos detectores.

Por otro lado, en lo que respecta a los sensores de intensidad, también existen multitud de posibilidades para su implementación. Entre las técnicas más conocidas podemos enumerar: interrupción de la luz por desplazamiento de una lámina, desplazamiento relativo de dos fibras, modulación de las pérdidas del núcleo o de la cubierta por curvatura o acoplamiento de modos evanescentes con otra fibra, etc. Como ejemplo, los fundamentos de la técnica basada en una lámina que obstaculiza el acoplamiento de luz entre dos fibras. Un mecanismo sensible a determinado parámetro físico, por ejemplo presión o vibración, desplaza la lámina en mayor o menor grado, modulando de este modo la intensidad óptica que se detecta a la salida del sistema.

Capítulo 5

Beneficios del Proyecto

5.1. Beneficios

Este proyecto aporta beneficios técnicos, económicos y sociales. A continuación, detallamos dichas aportaciones.

5.1.1. Beneficios Técnicos

- Aporta una novedosa tecnología de gran precisión y muy sensible a variaciones físicas.
- Ofrece una alternativa en sensado óptico a dispositivos más complejos de fabricar como por ejemplo a los basados en técnicas de interferometría.

5.1.2. Beneficios Económicos

- Esta tecnología permite la fabricación de dispositivos de sensado óptico más económicos, permitiendo a las empresas que necesitan de su uso, ahorrar en su adquisición.
- Esta tecnología es capaz de medir curvaturas y torsión, por lo tanto es adaptable a cadenas de producción que requieran un control sobre estos parámetros y realizar un control de calidad en el mismo proceso de fabricación, detectando piezas defectuosas antes de seguir adelante en su proceso de fabricación, aportando así un ahorro económico.

5.1.3. Beneficios Sociales

- Al abaratarse los dispositivos de sensado óptico fabricados con esta tecnología, permitirá a su vez, abaratar el producto final que ofrecen las empresas que hagan uso de la misma, por lo tanto la masa social que consume sus productos se verá beneficiada.
- La fabricación de este tipo de fibras compuestas de polímero, requiere de menor energía que la fabricación de fibras cuyo componente material es el cristal, contribuyendo de esta manera a conservar el medio ambiente.

Capítulo 6

Selección de Alternativas

6.1. Análisis de Alternativas

En este proyecto, se ha tratado de realizar un montaje experimental que permita realizar medidas con la máxima precisión y la mínima manipulación de la fibra. Después de un estudio detallado de las necesidades del proyecto, se han analizado dos alternativas, cuya descripción se detalla a continuación.

6.1.1. Montaje Experimental con Polarización Circular

Consiste en inyectar luz con polarización circular a través de la mPOF, a la salida de la misma, atravesará un prisma de Wollaston y a continuación llegará a un detector. Con este montaje, se mide la birrefringencia de la fibra [17].

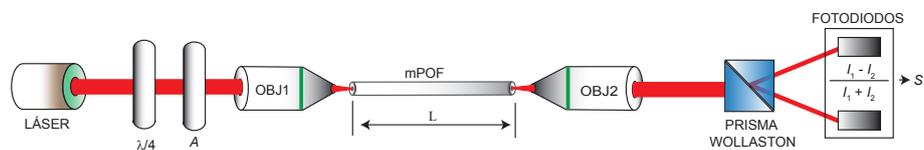


Figura 6.1: Montaje experimental con polarización circular

Explicación Matemática

Podemos considerar la mPOF como un retardador lineal (sección 2.1.1) y expresar la birrefringencia lineal, por un retardo δ , (*grados*⁻¹) o bien por la longitud de batido, $L_B = 2\pi/\delta$, explicado más adelante, (sección 8.2.2) siendo X e Y los ejes de la fibra.

La propagación de una polarización circular de entrada, a través de una fibra birrefringente y un prisma de Wollaston puede ser descrito por un producto de matrices de matrices de Jones [19].

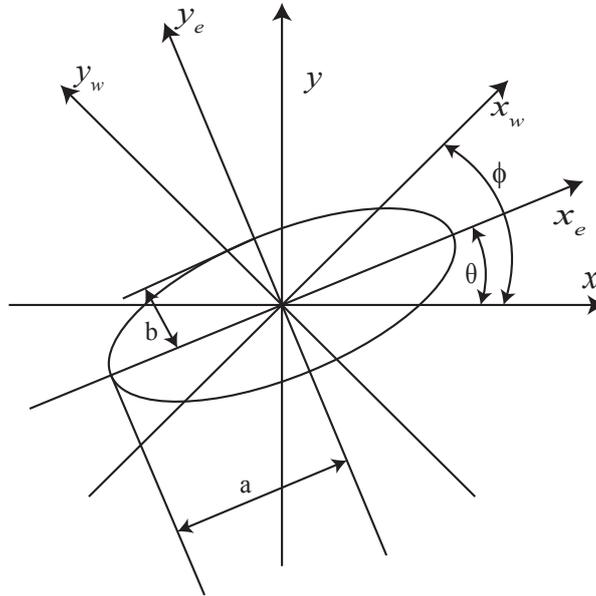


Figura 6.2: Sistema de coordenadas

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\frac{\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\delta}{2}} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

donde ϕ es el ángulo entre las principales direcciones X_w e Y_w del prisma de Wollaston y los ejes X e Y .

X_e e Y_e son las direcciones del semieje mayor y semieje menor de la elipse respectivamente. Figura 6.2.

δ es el retardo lineal de la fibra y $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}$ es la salida normalizada de la luz.

$$I_1 = |E_x|^2 = \frac{1}{2}(1 + \sin 2\phi \sin \delta) \quad (6.2)$$

$$I_2 = |E_y|^2 = \frac{1}{2}(1 - \sin 2\phi \sin \delta) \quad (6.3)$$

La birrefringencia es dada por la relación:

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin 2\phi \sin \delta$$

que alcanza su máximo cuando $\phi = \frac{\pi}{4}$ ó $(2m + 1)\frac{\pi}{4}$

$$S = S_{max} = \sin \delta$$

En consecuencia, δ se obtiene rotando el prisma de Wollaston hasta que S alcance un máximo.

6.1.2. Montaje Experimental con Polarización Lineal

Este montaje consiste en enviar luz linealmente polarizada a través de la mPOF desde una fuente láser usando un objetivo de microscopio, la luz emergente a la salida de la mPOF es colimada usando otro objetivo y a continuación atravesará una lámina $\lambda/4$ y un polarizador antes de llegar a un fotodetector. Con el fin de determinar la birrefringencia de la mPOF y la orientación de los ejes rápido y lento, los ángulos relativos entre los ejes de los polarizadores y la lámina $\lambda/4$ se saben gracias a una configuración previa de los mismos. Figura 6.3

Explicación Matemática

Es sabido que, en general, la luz emergente de un material birrefringente está elípticamente polarizada. Una técnica utilizada para medir la elipticidad y orientación de la elipse a la salida es usar una lámina retardadora $\lambda/4$ y un

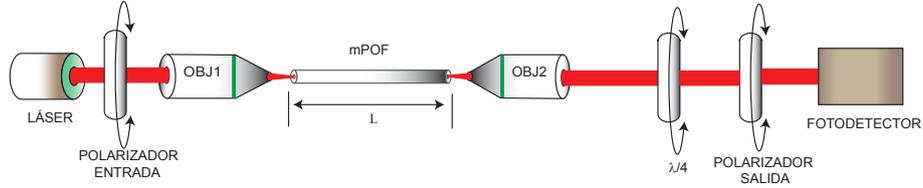


Figura 6.3: Método experimental con polarización lineal

polarizador para anular la luz [20]. Este efecto puede ser visto usando el método de cálculo de Jones [19]. Considerando un sistema de coordenadas rectangular OX, OY, OZ donde Z es la dirección de propagación y X e Y son las direcciones del eje lento y rápido de la fibra respectivamente, de un medio con un retardo lineal δ . Si luz linealmente polarizada con un ángulo θ respecto del eje lento, es lanzada a través de dicho medio, entonces las componentes de campo eléctrico están dadas por:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{j\frac{\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\delta}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} E_0 e^{j\omega t}$$

En general, la luz emergerá elípticamente polarizada y el semieje mayor de la elipse formará un ángulo ϕ con el eje X . Si E_1 y E_2 son respectivamente el semieje mayor y el semieje menor, entonces

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

El parámetro de polarización P da una medida de la elipticidad de la luz emergente y es definida por

$$P = \frac{(|E_1|^2 - |E_2|^2)}{(|E_1|^2 + |E_2|^2)} \quad (6.5)$$

$P = 1$ corresponde a una polarización lineal y $P = 0$ a polarización circular de la luz. Después de una adecuada manipulación se puede demostrar que

$$P^2 = \cos^2 \theta + \cos^2 \delta \sin^2 \theta \quad (6.6)$$

y

$$\tan 2\phi = \cos \delta \tan 2\theta \quad (6.7)$$

Se coloca un lámina $\lambda/4$ en el haz de luz emergente de la mPOF y se rota, siempre se encuentra una posición en la cual, la luz emergente de la lámina $\lambda/4$, esta polarizada linealmente. En esta posición la luz puede ser anulada usando un polarizador. Se puede demostrar que en esta posición, el semieje mayor y el semieje menor de la elipse de polarización son paralelos a al eje rápido y eje lento de la lámina $\lambda/4$. Además si el parámetro de polarización de la luz es igual a P entonces, el ángulo ξ entre la dirección del eje rápido de la lámina $\lambda/4$ y la dirección del eje de aceptación del polarizador es dado por

$$P = \cos 2\xi \quad (6.8)$$

Mediante una cuidadosa calibración de las orientaciones relativas del polarizador de entrada, la lámina $\lambda/4$ y el polarizador de salida, se mide el ángulo ξ y se puede calcular el valor de P . También, el ángulo $\theta - \phi$ puede ser deducido.

6.2. Criterios de Selección

Para elegir la mejor alternativa al montaje experimental, se han valorado diferentes criterios necesarios para conseguir los objetivos del proyecto. A continuación se describen dichos criterios:

- **Parámetros medibles:** Tiene una mayor valoración, el montaje experimental que ofrezca un mayor número de parámetros medibles.
- **Demostración matemática:** Tiene una valoración más alta el montaje experimental cuyo análisis y demostración matemática sea más sencillo.
- **Montaje experimental:** Se valora el grado de dificultad de la realización del montaje, otorgándole una valoración mayor al montaje cuyo grado de dificultad sea menor.

CRITERIO	PONDERACIÓN (Puntos %)	MONTAJE POL. CIRCULAR	MONTAJE POL. LINEAL
Parámetros medibles	70	6	9
Demostración matemática	20	8	7
Montaje experimental	10	8	7
TOTAL	100	6.6	8.4

Tabla 6.1: Criterios de selección del montaje experimental

6.3. Selección de la Solución

Después de analizar y valorar ambas alternativas, Tabla 6.1, se ha optado por el montaje experimental con polarización lineal. El factor determinante, es que mediante este montaje se obtiene el ángulo relativo de los ejes ópticos de la mPOF respecto del sistema de coordenadas que se ha configurado en el montaje, este hecho, sumado a que también se puede calcular la birrefringencia, nos permite calcular otros parámetros de la mPOF como la longitud de batido, el efecto de la curvatura, y el efecto de la torsión en la mPOF. Conocer el comportamiento de la mPOF cuando es sometida a las acciones mencionadas, es muy interesante para aplicaciones de sensado óptico, siendo este el objetivo del proyecto.

Capítulo 7

Componentes del Sistema de Medidas

7.1. Componentes Ópticos

Para conseguir los objetivos mencionados en 3.2.1, es necesario disponer de componentes ópticos de gran calidad así como equipos de medida de máxima precisión.

Además de dichos componentes y equipos se necesita motores rotatorios de máxima precisión y controlados por software.

Otro componente fundamental del sistema de medidas, es el sistema de acoplamiento de fibra, ya que para acoplar bien la luz, es necesario disponer de gran precisión micrométrica en el manejo de la luz.

Por todo lo mencionado anteriormente, en este proyecto se ha dispuesto del material que ha garantizado cumplir con las exigencias del estudio.

A continuación se detallan las características y especificaciones de la mPOF que se han utilizado y de todos los componentes y aparatos de medida que se han utilizado en el sistema de medidas.

7.1.1. mPOF

Es el componente objeto de estudio del proyecto. En la Figura 1.1(a) se puede observar un corte transversal y en la Tabla 7.1 sus propiedades y características.

Índice de refracción (n_{co})	1,492
Diámetro fibra (μm)	340
Diámetro núcleo (μm)	8
Pérdidas 650 nm (dB/m)	1.6
Propiedades modales	Monomodo
Material núcleo/revestimiento	PMMA
Material recubrimiento externo	PC

Tabla 7.1: Características de la mPOF

7.1.2. Fuente de Luz

La fuente de luz que se ha utilizado es un láser He-Ne, Figura 7.1, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 7.2. [25]



Figura 7.1: Láser He-Ne

Longitud de onda	632.8 nm
Min. pot. salida (TM_{00} , 633nm)	5.0 mW
Polarización	Aleatoria
Diámetro del haz	0.81 mm
Divergencia del haz	1.0 mrad
Pureza del modo	> 95 %
Espa. modo longitudinal	435 MHz
Ruido	(RMS) 0,2 % (30Hz a 10MHz)

Tabla 7.2: Especificaciones láser He-Ne

7.1.3. Telescopio Óptico

Se ha realizado el montaje de un telescopio óptico para ampliar y colimar el *spot*¹ del láser.

Para ello se han utilizado dos lentes, la primera que es atravesada por la luz, es cóncava-plana y su función es hacer que la luz diverga ampliando así el *spot*. Sus especificaciones se muestran en la Figura 7.2 y se detallan en la Tabla 7.3. [25]

¹Área del haz láser a la salida de éste.

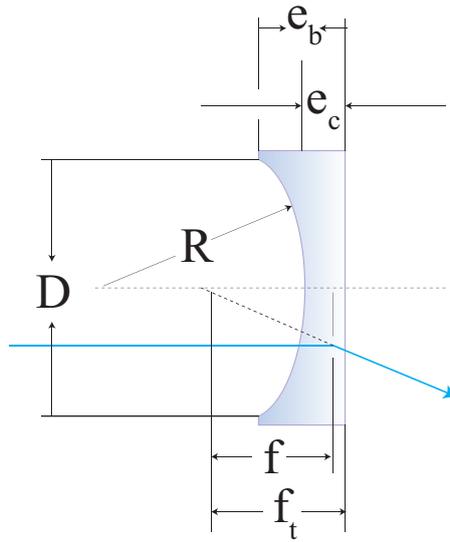


Figura 7.2: Especificaciones de la lente cóncava-convexa

Diámetro (D)	25.4 mm
Distancia focal (f)	-30 mm
Radio de curvatura (R)	23.4 mm
Espesor en el centro (e_c)	3.5 mm
Espesor en los bordes (e_e)	47.3 mm
Distancia focal trasera (f_t)	-16.7 mm

Tabla 7.3: Especificaciones de la lente cóncava-plana

La segunda lente que atraviesa la luz es biconvexa y su función es converger y colimar la luz que llega desde la primera lente. Sus características se pueden ver en la Figura 7.3 y sus especificaciones en la Tabla 7.4.

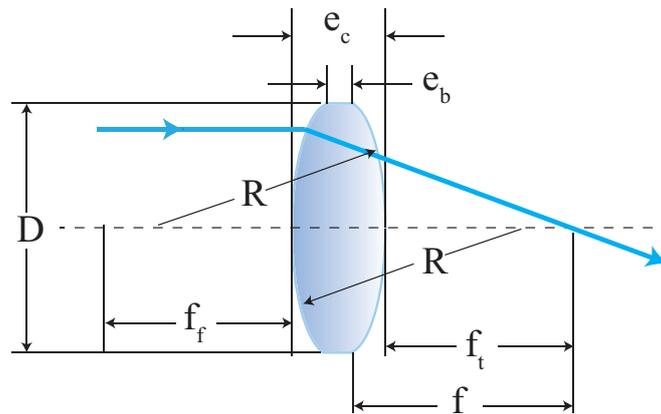


Figura 7.3: Especificaciones de la lente biconvexa

Diámetro (D)	25.4 mm
Distancia focal (f)	150 mm
Radio de curvatura (R)	154 mm
Espesor en el centro (e_c)	3.1 mm
Espesor en los bordes (e_b)	2 mm
Distancia focal trasera (f_t)	149 mm

Tabla 7.4: Especificaciones de la lente biconvexa

En las Figuras 7.4 (a) y (b), se pueden ver las imágenes de la lente concavo-plana y biconvexa respectivamente. Debajo de las mismas se puede ver la evolución del haz de luz según va atravesando las lentes.



(a) Lente cóncavo-plana



(b) Lente biconvexa

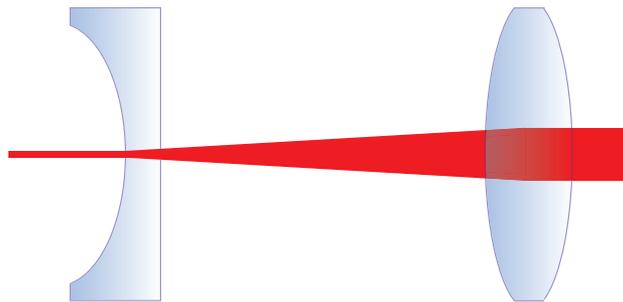
(c) Aumento y colimación del *spot*

Figura 7.4: Lentes del telescopio óptico

Para la sujeción y posicionamiento de la distancia óptima de las lentes se ha utilizado un soporte como el de la Figura 7.5.



Figura 7.5: Soporte del telescopio óptico

7.1.4. Espejos

Para guiar la luz que emerge desde el telescopio óptico, se han utilizado dos espejos como el de la Figura 7.6, cuyas características y especificaciones se detallan en la Tabla 7.5 [25].



(a) Espejo

(b) Montura

Figura 7.6: Sistema de fijación del espejo

Diámetro	25.4 mm
Espesor	6 mm
Material sustrato	Sílice fusionado
Apertura	> 90 % Diámetro
Planitud de superficie frontal	$\lambda/10$ a 633 nm

Tabla 7.5: Especificaciones del espejo

7.1.5. Polarizadores

Para el montaje descrito en la Figura 6.3, se han usado dos polarizadores como el de la Figura 7.7 (a), cuyas especificaciones se muestran en la tabla 7.5. Para rotar los polarizadores, hemos dispuesto de motores rotatorios de precisión y controlados por programa informático como el de la Figura 7.7 (b). Sus especificaciones se detallan en la Tabla 7.7.[25]



(a) Polarizador



(b) Motor rotatorio de precisión

Figura 7.7: Sistema de control del ángulo de polarización lineal

Material	Calcita
Distorsión del frente de onda	$\leq \lambda/4$ a 633 nm
Apertura	10mm
Desvió del haz transmitido	< 3 arc min
Ángulo de aceptación	14°-16° completo

Tabla 7.6: Especificaciones del polarizador

Rango	360° rotación continua
Repetibilidad bidir.	$\pm 0.1^\circ$
Reacción	$\pm 0.3^\circ$
Vel. rotación (max)	25 grados/seg
Precisión abs. en el eje	0.1%
Precisión volver inicio	$\pm 0.2\%$

Tabla 7.7: Especificaciones del motor rotatorio

7.1.6. Objetivos de Microscopio

Para acoplar la luz en el núcleo de la mPOF, ($3 \mu m$ de diámetro), Tabla 7.1, se ha utilizado un objetivo de microscopio que reduzca el área del haz de luz. A la salida de la mPOF se busca el efecto contrario, ampliar el haz de luz. En la figura Figura 7.8 (b) se muestra el efecto que se consigue. Uno de los objetivos que se ha utilizado se muestra en la Figura 7.8 (a). Sus especificaciones se detallan en la Tabla 7.8.[25]

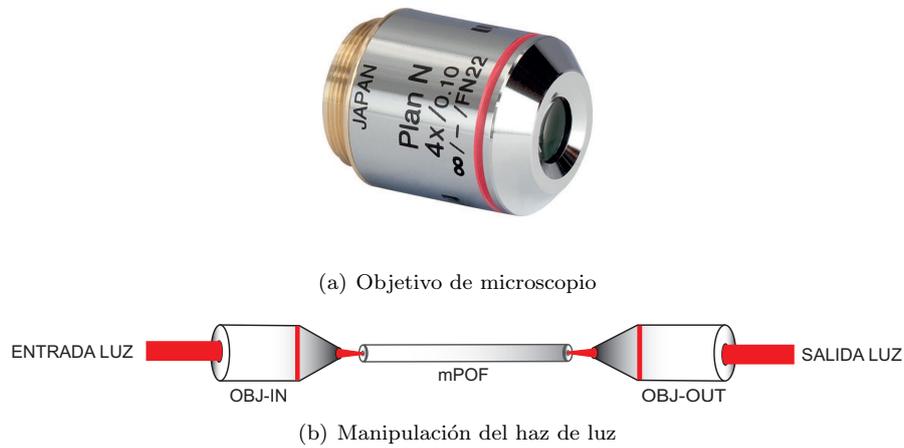


Figura 7.8: Acoplamiento de la luz en la mPOF

Diámetro	24 mm
Longitud	30.89 mm
Aumento	4X
Apertura numérica (AN)	0.10
Número de campo	22
Distancia de trabajo	18.5 mm
Distancia focal efectiva	45 mm
Rango λ	Visible

Tabla 7.8: Especificaciones del objetivo de microscopio de entrada a la mPOF

7.1.7. Sistema de Acoplamiento de Fibra

Tanto los objetivos como la mPOF, se sujetan mediante un sistema con el cual se pueda ajustar el haz de luz emergente del objetivo de microscopio a la entrada de la mPOF y el haz de luz emergente de la mPOF, una vez atravesada la misma, en el objetivo de microscopio de salida con una precisión de micras. La mPOF se sujeta con una abrazadera como el de la Figura 7.9 (a). Para sujetar los objetivos de microscopio se han empleado unas monturas roscadas como la de la Figura 7.9 (b). Ambos componentes se añaden a una plataforma multiejes, Figura 7.9 (c), que permite ajustar la posición de la mPOF en las tres direcciones espaciales con una precisión de micras. Las especificaciones de dicha plataforma se detallan en la Tabla 7.9.[25]



(a) Abrazadera para fibra



(b) Montura objetivo microscopio



(c) Plataforma multiejes una vez añadidas la abrazadera y la montura

Figura 7.9: Sistema de acoplamiento de la fibra

Desplazamiento manual	4 mm
Ajuste grueso	0.5 mm /rev
Ajuste fino	50 μm /rev
Desplazamiento piezoeléctrico	20 μm
Resolución mando manual	50 nm
Max voltaje piezoelectrico	75 VDC

Tabla 7.9: Especificaciones de la plataforma multiejes

7.1.8. Abrazadera Rotatoria para Fibra

Para estudiar el efecto que produce la torsión de la mPOF en la polarización de la luz, se necesita rotar la fibra y conocer el ángulo de dicha rotación, para ello, se ha utilizado una abrazadera rotatoria de fibra como la de la Figura 7.10. Sus especificaciones se detallan en la Tabla 7.10.[25]



Figura 7.10: Abrazadera Rotatoria de Fibra.

Rango de Rotación	360°
Excentricidad	< 20 μm
Rosca de montaje	RMS

Tabla 7.10: Especificaciones de la abrazadera rotatoria.

7.1.9. Medidor de Potencia

En la primera fase del estudio, en la que se ha localizado la posición de los ejes ópticos respecto del sistema de coordenadas que se ha establecido, tal y como se explica en el apartado 6.1.2, ha sido necesario medir la potencia de la luz. Para ello se han utilizado un medidor de potencia y un fotodetector, como los mostrados en la Figura 7.11. Las especificaciones del medidor de potencia y el fotodetector se detallan en las Tablas 7.11 y 7.12 respectivamente.[26]



Figura 7.11: Medidor de potencia y fotodetector

Muestreo	250 KHz
Precisión	$\pm 0,1\%$ Para pico a pico $\pm 0,1\%$ para CW.
Resolución	0.0004%
Rango de frecuencia	1 Hz - 250 KHz Para medidas de frecuencia.
Detecs. compatibles	Fotodiodo, Termopila y Piroeléctrico.
Ancho de banda	500 KHz (Fotodiodo), 1.9 MHz (Termo o Piro)

Tabla 7.11: Especificaciones del medidor de potencia.

Rango espectral	400 a 1100 nm
Max. potencia medible	2 W
Diámetro activo	1.13 cm
Densidad de potencia	30 W/m ²
Área activa detector	1 cm ²
Incertidumbre de calibración	1% 400-940 nm

Tabla 7.12: Especificaciones del fotodetector.

7.1.10. Polarímetro

Para el análisis de la polarización de la luz hemos utilizado un polarímetro con sensor externo como el de la Figura 7.12, sus especificaciones se muestran en la Tabla 7.6.[25]



Figura 7.12: Polarímetro

El sensor externo, está provisto de una lámina $\lambda/4$ rotatoria, un polarizador en una posición fija y un fotodiodo. La lámina $\lambda/4$ transforma la polarización de entrada, el polarizador sólo transmite la porción de luz que es paralelo al eje de transmisión y el fotodiodo actúa como un medidor de potencia. La polarización de entrada es manipulada por la lámina $\lambda/4$ rotatoria y la polarización correspondiente depende del ángulo de la lámina $\lambda/4$.

Este polarímetro está provisto de un software muy completo que proporciona datos sobre diversos parámetros que son fundamentales para realizar el estudio de la luz, tales como el grado de polarización, estado de polarización, parámetros de Stokes ², azimut, elipticidad, diferencia de fase, esfera de Poincare, etc. En la Figura 7.13 se puede ver el aspecto de la interface del software.

²Conjunto de valores que determinan el estado de polarización de la luz.

Rango λ	400 - 700 nm
Rango de potencia	-60 dBm a 10 dBm
Rango dinámico	70 dBm
Precisión grado pol.	$\pm 0.5 \%$
Precisión estado pol.	$\pm 0.25 \%$
Precisión azimut.	$\pm 0.25 \%$
Precisión elipticidad	$\pm 0.25 \%$

Tabla 7.13: Especificaciones del polarímetro

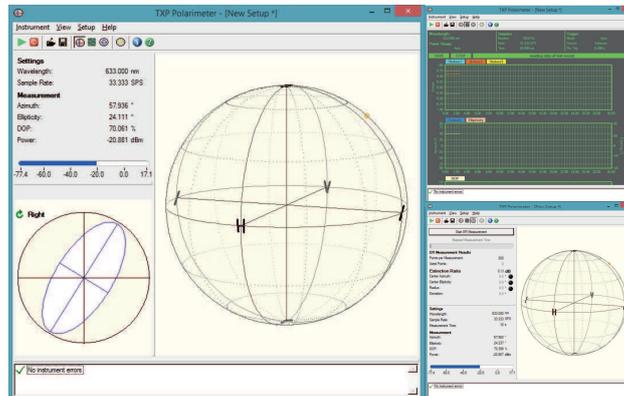


Figura 7.13: Interfaz del software del polarímetro

7.1.11. Mesa Óptica

Para confeccionar los montajes experimentales necesarios y desarrollar el estudio del que es objeto este proyecto, es necesario alinear y situar con mucha precisión los elementos ópticos descritos con anterioridad, así como una gran estabilidad, para lo cual, ha sido necesaria una mesa óptica como la de la Figura 7.14. Las especificaciones de la misma se detallan en la Tabla 7.14.[25]



Figura 7.14: Mesa óptica

Superficie	2000 mm x 1200 mm
Espesor	210 mm
Planitud	± 0.1 mm
Hilo de rosca	M6
Espaciado	25 mm entre centros

Tabla 7.14: Especificaciones de la mesa óptica

7.1.12. Aplicación de Computación

Para realizar cálculos, generar gráficos, desarrollar aplicaciones y documentos se ha utilizado la aplicación de computación "Wolfram Mathematica 9".[27]

7.1.13. Otros Componentes

Para realizar los diferentes diseños experimentales, además de los componentes ópticos descritos anteriormente, ha sido necesaria la fabricación de distintas piezas mecanizadas, tanto para someter a la mPOF a diferentes situaciones, como por ejemplo curvatura, Figura 7.15 (a) o para realizar las medidas experimentales con la mínima manipulación de la mPOF, ya que la polarización es un parámetro extremadamente sensible y por lo tanto se requiere de máxima precisión en las medidas y un extremado cuidado en la manipulación de la fibra, como en el caso de medir la longitud de batido, Figuras 7.15 (b) y (c). Estas piezas no son comerciales, por lo tanto se ha requerido de talleres de mecanizado especializados para su fabricación bajo pedido.

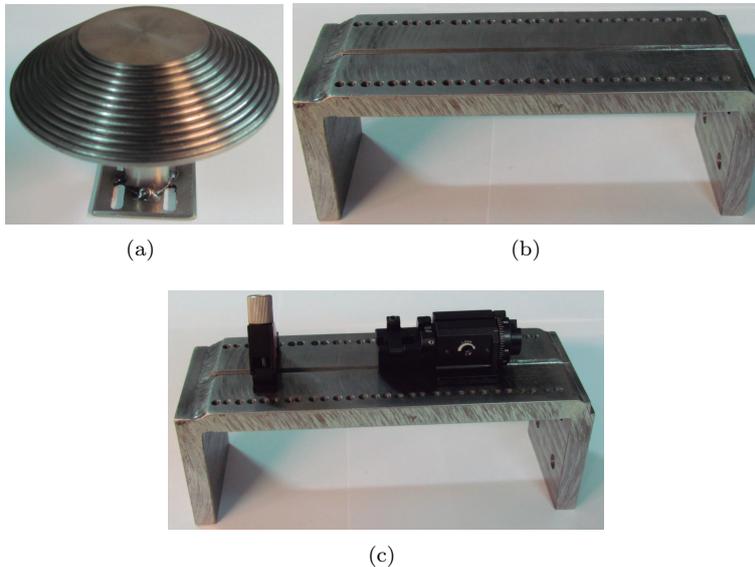


Figura 7.15: Piezas mecanizadas para realizar medidas de curvatura (a) y longitud de batido (b) y (c)

Capítulo 8

Diseño y Desarrollo del Trabajo

8.1. Sistemas de Medida

Para conseguir los objetivos técnicos descritos en el apartado 3.2, se han realizado modificaciones en el diseño del montaje experimental a medida que se ha avanzado en el estudio. A continuación se describen los diferentes diseños realizados.

8.1.1. Diseño para el Cálculo de la Posición de los Ejes Ópticos

Para conocer la posición de los ejes ópticos de la mPOF respecto de un sistema de referencia, se ha realizado un diseño experimental acorde a lo explicado en el apartado 6.1.2 y mostrado en la Figura 6.3.

En la Figura 8.1 se puede ver una ilustración del diseño.

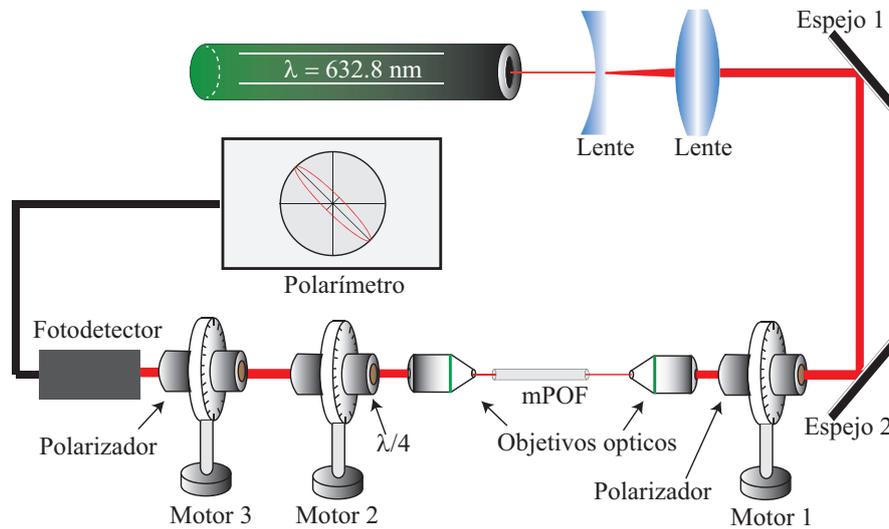


Figura 8.1: Montaje experimental para calcular la posición de los ejes ópticos.

8.1.2. Diseño para Determinar la Longitud de Batido

El cálculo de la longitud de batido, se ha realizado mediante un proceso que consiste en realizar un corte de 2 mm a la mPOF y medir los parámetros de la polarización con el polarímetro, repitiendo este proceso, hasta obtener una secuencia completa de la longitud de batido. En la Figura 8.2 se puede ver el diseño del montaje experimental.

8.1.3. Diseño para Estudiar el Efecto de la Curvatura en la mPOF

Para estudiar la polarización de la luz cuando la mPOF es sometida al efecto de la curvatura, se han utilizado discos con diferentes radios, 7.15 (a), y se ha medido su efecto, sometiendo a la fibra a curvaturas que van de 2.5 a 5 cm de radio. En la Figura 8.3 se puede ver una ilustración del montaje experimental que se ha utilizado.

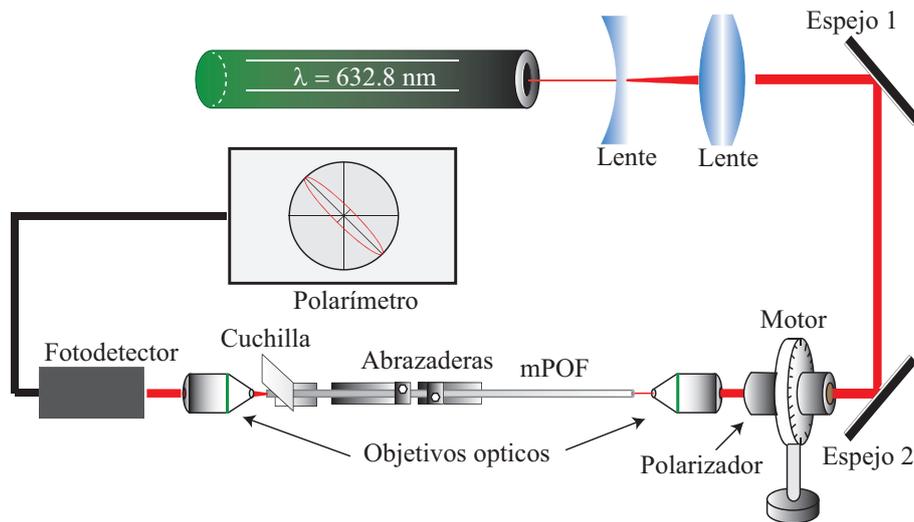


Figura 8.2: Montaje experimental para medir la longitud de batido

8.1.4. Diseño para Estudiar el Efecto de la Torsión en la mPOF

Para someter a la fibra a torsión, se ha utilizado una abrazadera rotatoria como la de la Figura 7.10. Se han realizado medidas sobre el cambio de polarización de la luz a la salida de la mPOF, sometiendo a la fibra a una torsión que varía de 0 a 180° en pasos de 5° . En la Figura 8.4 se puede ver una ilustración del montaje experimental utilizado.

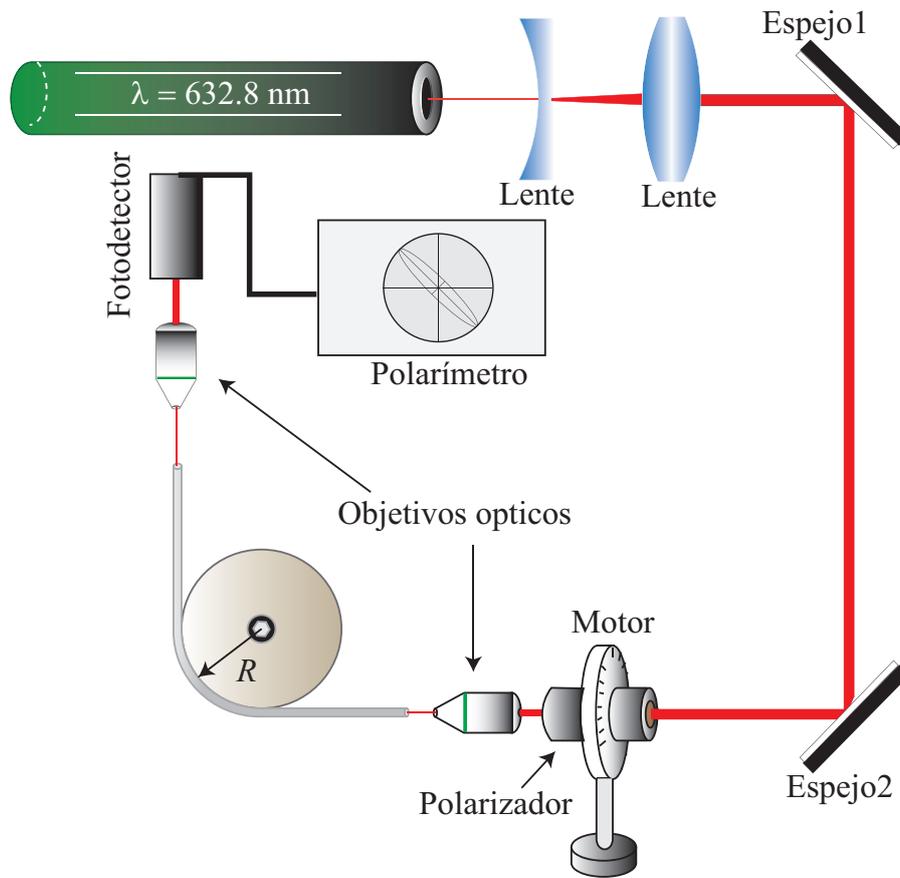


Figura 8.3: Diseño para estudiar el efecto de la curvatura en la mPOF

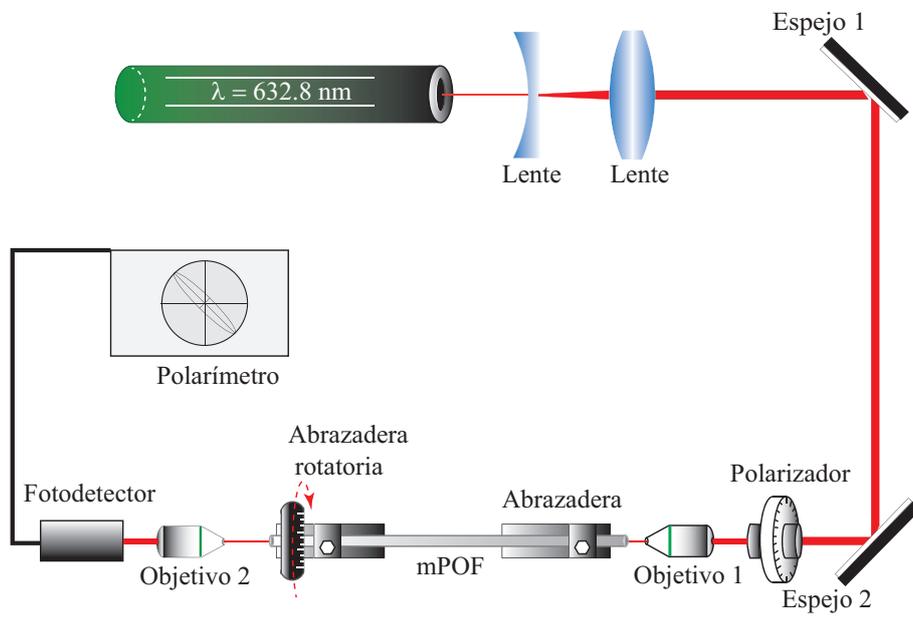


Figura 8.4: Diseño para estudiar el efecto de la torsión en la mPOF

8.2. Desarrollo del Trabajo

El proyecto se ha realizado siguiendo los pasos establecidos en la sección 3.2.1. A continuación se explica la metodología de los mismos.

8.2.1. Determinación de los Ejes Ópticos de la mPOF

El proyecto se ha iniciado realizando el montaje experimental de la Figura 8.1. A través del mismo se ha calculado la posición del eje lento de la fibra respecto de un sistema de referencia X_{lab}, Y_{lab} que adelante llamaremos sistema de referencia del laboratorio. Para dicho cálculo, se hace incidir en el núcleo de la mPOF, un haz de luz, cuyo campo eléctrico E_{in} esta linealmente polarizado y con un ángulo θ' respecto de X_{lab} . A la salida de la fibra, aparece el campo eléctrico E_{out} , normalmente, con polarización elíptica cuyo semieje mayor forma un ángulo ϕ' respecto de X_{lab} . A continuación se rota la lámina retardadora $\lambda/4$ hasta obtener a la salida de esta, luz polarización lineal, en este punto el semieje mayor de la elipse de polarización y el eje rápido de la lámina retardadora $\lambda/4$ son paralelos. Además, el ángulo ξ que aparece en la ecuación 6.8, es el formado entre la dirección del eje rápido de la placa $\lambda/4$ y la dirección de aceptación del polarizador de salida.

En la Figura 8.5 se puede observar una ilustración del método, y en el Anexo A sección A.1, se aporta el análisis matemático de las ecuaciones 6.6, 6.7 y 6.8. A partir de estas ecuaciones y utilizando la aplicación de computación *Wolfram Mathematica 9*, se ha calculado el valor del ángulo θ .

Una vez obtenido el valor de este ángulo, se puede acoplar la luz en la fibra de forma controlada, es decir, con el ángulo que se desee respecto de cualquiera de los ejes ópticos. Esto, permite realizar las siguientes medidas experimentales con el control necesario de la polarización, para caracterizar la fibra.

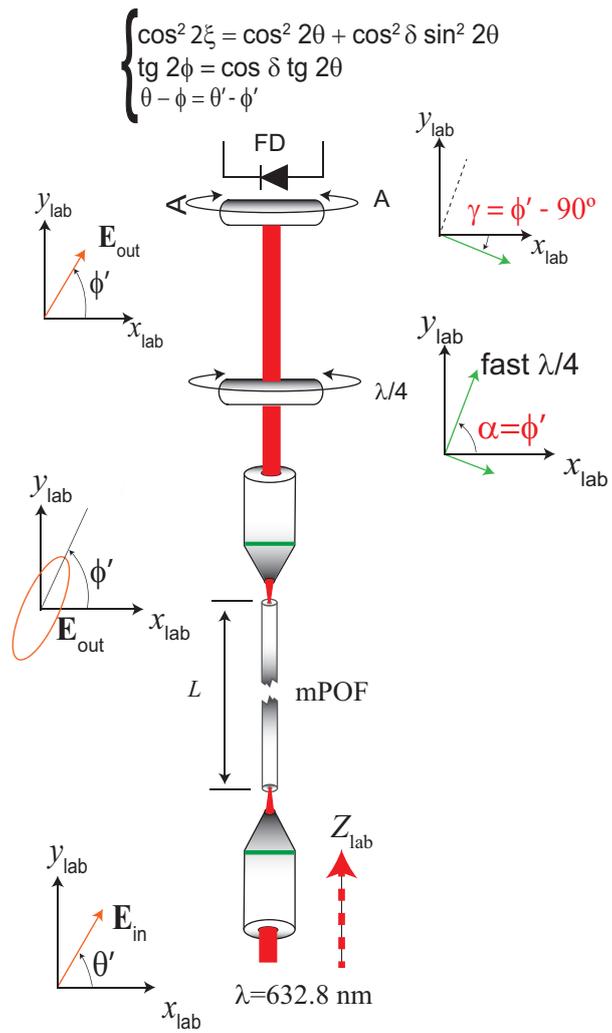


Figura 8.5: Método experimental para la determinación de los ejes ópticos. FD fotodetector.

8.2.2. Medida de la Longitud de Batido

Uno de los parámetros más importantes en una fibra óptica es la longitud de batido y se define como la longitud de fibra óptica en la que el cambio de fase debido a la birrefringencia es 2π .

Los parámetros β_x y β_y , son conocidos como las constantes de propagación:

$$\beta_x = \frac{n_x \omega}{c} \quad \beta_y = \frac{n_y \omega}{c} \quad (8.1)$$

Para un medio anisótropo, como una fibra óptica, usualmente, las componentes horizontal (x) y vertical (y), se asocian con el rápido lento y eje lento respectivamente, y se escribe como:

$$\beta_f = \frac{n_x \omega}{c} \quad \beta_s = \frac{n_y \omega}{c} \quad (8.2)$$

En el espacio libre, la constante de propagación es $\beta = 2\pi/\lambda$. La Birrefringencia B en un medio, tal como la fibra óptica se define como:

$$B = \frac{\omega}{c}(n_f - n_s) \quad (8.3)$$

Si la propagación es solo en el eje z , se puede escribir como:

$$E_x(r, t) = E_{0x} e^{j(\beta z - \omega t)} \quad (8.4)$$

$$E_y(r, t) = E_{0y} e^{j(\beta z - \omega t)} \quad (8.5)$$

Cogiendo la parte real de 8.4 y 8.5

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - \beta_x z) \quad (8.6)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - \beta_y z) \quad (8.7)$$

Consideramos ahora, el fenómeno de interferencia óptica. Para describir este comportamiento, consideramos dos ondas superpuestas propagándose en un mismo medio, en el espacio libre, con la misma amplitud y con diferentes parámetros de propagación. Usando cualquiera de las ecuaciones, 8.6 ó 8.7, la superposición de dos ondas en el mismo plano es:

$$E(z, t) = \cos(\omega t - \beta_1 z) + \cos(\omega t - \beta_2 z) \quad (8.8)$$

Cada uno de los componentes de 8.8 se propaga con diferente velocidad. El argumento de cada componente representa una fase y como la fase de la onda propagada, siempre debe ser constante, esto es, $\Phi(z, t) = cte$. Para el cambio en la fase, podemos escribir:

$$d\Phi(z, t) = \frac{\partial\Phi(z, t)}{\partial z} dz + \frac{\partial\Phi(z, t)}{\partial t} dt = 0 \quad (8.9)$$

La ecuación 8.9 puede ser expresada como una velocidad escribiéndola como:

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\frac{\partial\Phi(z, t)}{\partial t}}{\frac{\partial\Phi(z, t)}{\partial z}} \quad (8.10)$$

La ecuación 8.10 define la velocidad de fase v_p y cada componente tendrá una velocidad de fase:

$$v_{p1} = \frac{\omega}{\beta_1} = \lambda_1 f \quad v_{p2} = \frac{\omega}{\beta_2} = \lambda_2 f \quad (8.11)$$

teniendo en cuenta que $\beta = 2\pi/\lambda$, la relación de velocidades será:

$$\frac{v_{p1}}{v_{p2}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (8.12)$$

Desarrollando la ecuación 8.12 se puede asegurar que [1]:

$$L_B = \frac{2\pi}{\beta_1 - \beta_2} = \frac{\lambda}{\Delta n_{eff}} \quad (8.13)$$

Donde Δn_{eff} es la diferencia de índices efectivos de refracción entre el eje x y el eje y .

En este proyecto, para determinar la longitud de batido de la fibra se ha realizado el montaje de la Figura 8.2. Mediante el polarizador de entrada se acopla el campo eléctrico con un ángulo de 45° respecto del eje lento de la fibra x_f . Después, se realizaron cortes sucesivos de 2 mm de longitud y se guardaron los datos relativos a la evolución de la polarización que se han obtenido mediante el polarímetro, Figura 7.12, tras cada corte.

Se han realizado cortes hasta que el estado de polarización ha realizado un ciclo completo. La longitud total de los cortes corresponderá a la longitud de batido de la fibra.

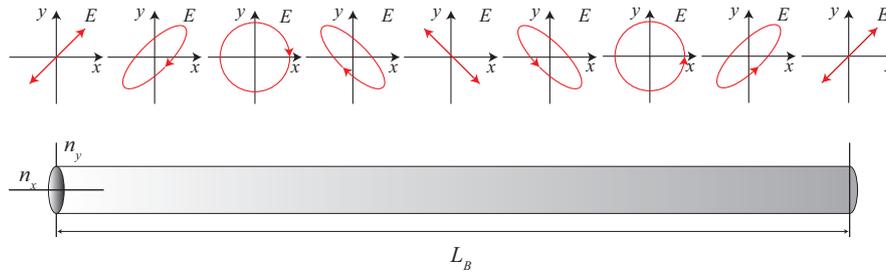


Figura 8.6: Transformación periódica del estado de polarización con la longitud de batido

Para no alterar la posición de la fibra tras cada corte, se han utilizado dos abrazaderas como se puede ver en la Figura 8.2.

En la figura siguiente se muestra el procedimiento secuencial que se ha utilizado para determinar la longitud de batido.

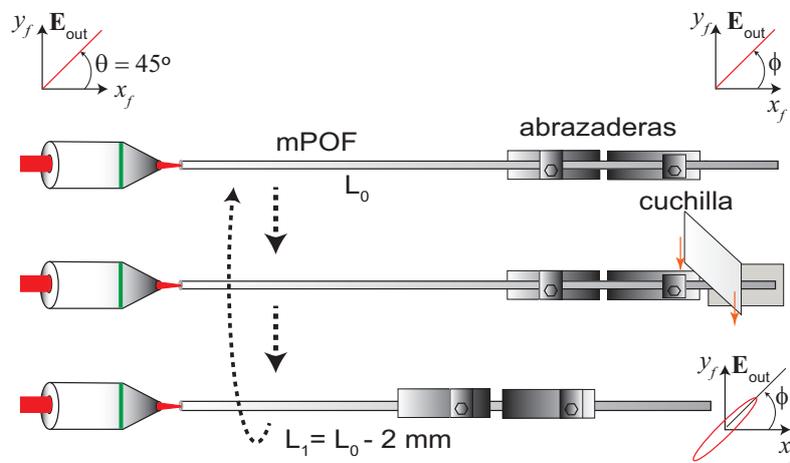


Figura 8.7: Procedimiento para medir la longitud de batido de la fibra

8.2.3. Medidas para el Estudio del Efecto de la Curvatura en la mPOF

Se puede inducir birrefringencia lineal en la mPOF por una influencia externa. Esto puede ser causado por un *stress* mecánico exterior (presión o fuerza de tensión) en el revestimiento de la fibra y este a su vez transfiere esta fuerza al núcleo. Esto induce en los ejes de simetría, x e y dos nuevos índices de refracción n_x y n_y .

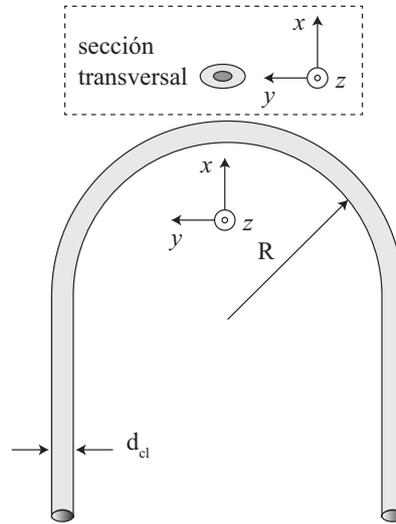


Figura 8.8: Relación geométrica de la fibra sometida a curvatura causando birrefringencia lineal

La diferencia de índices efectivos de refracción en el eje x y eje y será [21]

$$\Delta n_{eff} = \frac{1}{2} C_f \frac{d_{cl}^2}{R^2} + 2\zeta C_f \frac{d_{cl}}{R} \quad (8.14)$$

Y el cambio de fase de los modos se expresa como

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{2} C_f \frac{d_{cl}^2}{R^2} + 2\zeta C_f \frac{d_{cl}}{R} \right] \quad (8.15)$$

Donde C_f es el coeficiente característico de la fibra dado por

$$C_f = \frac{1}{2} \left(\frac{n_{co} - n_{cl}}{2} \right)^3 (r_{11} - r_{12})(1 - v_{co}) \quad (8.16)$$

ζ es la relación de deformidad de los ejes causados por tensiones longitudinales. Los términos del lado derecho de las ecuaciones 8.14 y 8.15 representan una situación cuando una fuerza de tensión actúa sobre la fibra. Esto puede ocurrir cuando la fibra rodea un sólido. Si la fibra se curva sin fuerzas añadidas de tensión, las relaciones 8.14 y 8.15 son simplificadas. Entonces, el cambio de fase es

$$\Delta\Phi = \frac{\pi}{\lambda} C_f \frac{d_{cl}^2}{R^2} \quad (8.17)$$

La ecuación 8.17 puede ser sustituida por otra donde el coeficiente de la fibra C_f puede ser reemplazada por el producto del módulo de Young E_c y el coeficiente foto elástico de la fibra \mathfrak{R} [22].

$$\Delta\Phi = \frac{\pi}{\lambda} E_c \mathfrak{R} \frac{d_{cl}^2}{R^2} \quad (8.18)$$

Para medir experimentalmente este desfase (rad/m), se ha realizado el montaje de la Figura 8.3, y en la Figura 8.9 se puede ver una ilustración del efecto físico.

Una vez calculada la posición de los ejes ópticos, y sea conocido el valor del ángulo θ' (sección 8.2.1), se acopla la luz con polarización lineal y paralela al eje x_f de la mPOF. La curvatura, induce una birrefringencia lineal a lo largo de la misma. Llamaremos x_{find} al eje rápido y y_{sind} a los ejes inducidos.

Entonces:

$$\vec{E}_{in} = E_o \cos \theta' \hat{x}_{tab} + E_o \sin \theta' \hat{y}_{tab}$$

debido a la birrefringencia lineal causada por la curvatura, a la salida tenemos:

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos \theta' e^{j\beta_{find}L} \hat{x}_{find} + E_o \sin \theta' e^{j\beta_{sind}L} \hat{y}_{sind}$$

Si

$$y_{sind} - x_{find} = \Delta n_i$$

$$\vec{E}_{out} = E_o e^{j\beta_{find}L} [\cos \theta' \hat{x}_{find} + \sin \theta' e^{j\Delta n_i L} \hat{y}_{sind}]$$

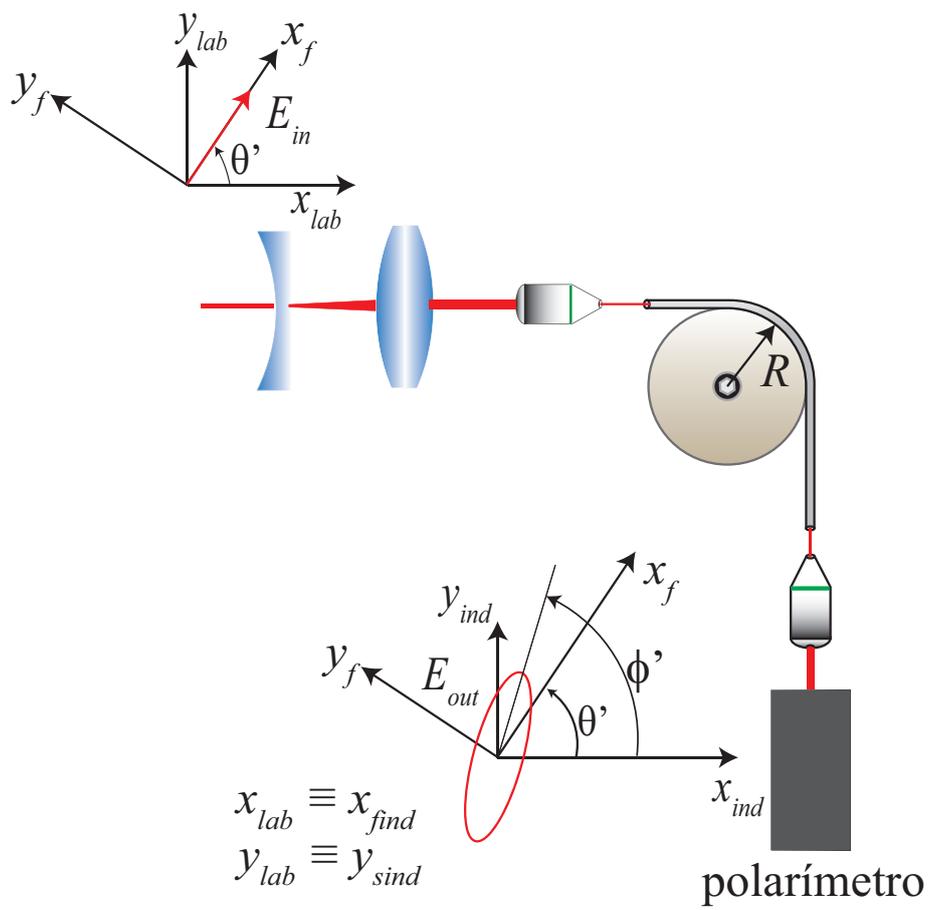


Figura 8.9: Ilustración geométrica del cálculo del desfase causado por curvatura.

$$\vec{E}_{out} \propto \cos \theta' \hat{x}_{lab} + \sin \theta' e^{j\Delta n_i \beta L} \hat{y}_{lab}$$

$$\vec{E}_{out,r} = \vec{E}_{or} = \cos \theta' \hat{x}_{lab} + \sin \theta' \cos(\Delta n_i \beta L) \hat{y}_{lab}$$

$$\vec{E}_{out,i} = \vec{E}_{oi} = \sin \theta' \sin(\Delta n_i \beta L) \hat{y}_{lab}$$

El polarímetro (Figura 7.12) muestra la elipse de polarización y nos proporciona el valor de la elipticidad η y del azimut Φ' de la luz a la salida de la fibra.

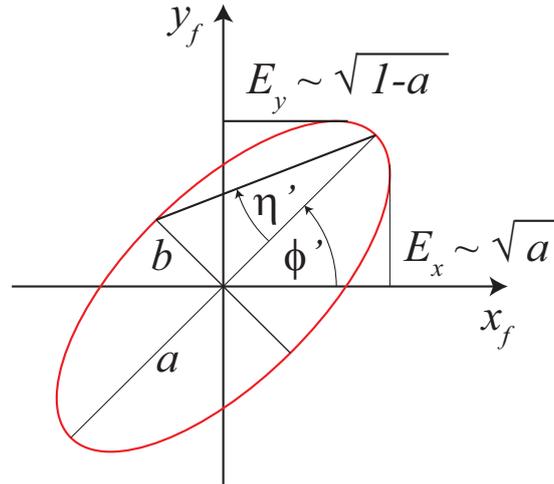


Figura 8.10: Representación de la elipse de polarización basada en datos aportados por el manual técnico del polarímetro.

Por lo tanto el valor del semi-eje mayor de la elipse de polarización será:

$$a = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\Phi' \cos \eta') \quad (8.19)$$

Del Anexo B.1 ecuaciones B.1 se pueden deducir que $a = |b_1|$

Por lo tanto:

$$\vec{b}_1 = \left[\underbrace{\cos \theta' \hat{x}_{lab} + \sin \theta' \cos(\Delta n_i \beta L) \hat{y}_{lab}}_{\vec{E}_{or}} \right] \cos \Phi' + \left[\underbrace{\sin \theta' \sin(\Delta n_i \beta L) \hat{y}_{lab}}_{\vec{E}_{oi}} \right] \sin \Phi'$$

Si la elipticidad es suficientemente pequeña podemos decir que:

$$\sqrt{1-a} = \sin \theta' \cos(\Delta n_i \beta L) \cos \Phi' + \sin \theta' \sin(\Delta n_i \beta L) \sin \Phi'$$

De las medidas experimentales sabemos que Δn_i es muy pequeño, $\approx 10^{-6}$, por lo tanto:

$$\sqrt{1-a} = \sin \theta' \underbrace{\cos(\Delta n_i \beta L)}_{=1} \cos \Phi' + \sin \theta' \underbrace{\sin(\Delta n_i \beta L)}_{=\Delta n_i \beta L} \sin \Phi'$$

Entonces:

$$\sqrt{1-a} = \sin \theta' \cos \Phi' + \sin \theta' \Delta n_i \beta L \sin \Phi'$$

Despejando se obtiene la ecuación con la que se calcula el desfase que provoca la curvatura, multiplicada por la birrefringencia inducida por la misma.

$$\Delta n_i \beta = \frac{\sqrt{1-a} - \sin \theta' \cos \Phi'}{\sin \theta' \sin \Phi' L} \quad (8.20)$$

8.2.4. Medidas para el Estudio del Efecto de la Torsión en la mPOF

Si una sección de fibra con longitud l_f , se somete a una torsión aplicando una fuerza en el plano del eje de la fibra, se induce birrefringencia circular, con relación específica de torsión τ

$$\tau = \frac{\delta}{l_f}$$

Donde δ es el ángulo de torsión que se muestra en la Figura 8.11.

Como ya se ha dicho, en la sección 2.1.2, la birrefringencia circular, es el fenómeno por el cual, las velocidades de fase para las polarizaciones circulares ortogonales, son diferentes.

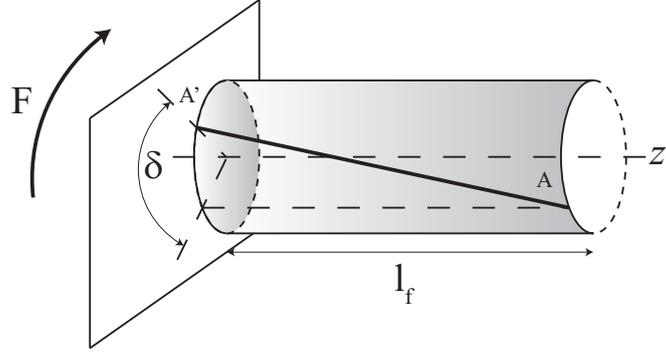


Figura 8.11: Sección de fibra con longitud l_f expuesta a torsión con ángulo δ .

El efecto de esta propiedad, es que una luz, linealmente polarizada, permanece linealmente polarizada en el interior del medio, pero la dirección de polarización rota sobre la dirección de propagación.

Con el fin de describir las propiedades ópticas de un núcleo de fibra anisótropa, es útil la matriz tensor de constantes dieléctricas ε [23].

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \Delta\varepsilon_t = \begin{pmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -g\tau y & 0 \\ g\tau y & 0 & -g\tau x \\ 0 & g\tau x & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon & -g\tau y & 0 \\ g\tau y & \varepsilon & -g\tau x \\ 0 & g\tau x & \varepsilon \end{pmatrix} \quad (8.21)$$

Donde ε_i es el tensor constante dieléctrica del medio original y $\Delta\varepsilon_t$ es el tensor de contribución de torsión. Las coordenadas x, y en la matriz $\Delta\varepsilon_t$ se refieren a A' en el plano donde son expresadas las constantes dieléctricas y los coeficientes g .

$$g = r_{44}n_c^4 = (r_{11} - r_{12})n_c^4 \quad (8.22)$$

Donde r_{11} , r_{12} y r_{44} son elementos de la matriz de componentes fotoelásticos del núcleo de la fibra. Para caracterizar la influencia de la torsión en el estado de polarización usaremos el cálculo de Jones [19].

La matriz de Jones para un medio modificado por torsión es de la forma [24]

$$T_c = \begin{pmatrix} 0 & -jg\tau \\ jg\tau & 0 \end{pmatrix} \quad (8.23)$$

La matriz T_c describe las propiedades de polarización de un medio con birrefringencia circular. El vector de Jones de una onda electromagnética, que se propaga a lo largo del eje z , es un vector columna, compuesto por las componentes E_x y E_y . El vector $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, describe una polarización lineal con un ángulo de 45° respecto del eje x .

Por lo tanto, el efecto de la torsión sobre una onda linealmente polarizada con un ángulo de 45° respecto del eje x será:

$$J_2 = T_c J_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & -jg\tau \\ jg\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -jg\tau \\ jg\tau \end{pmatrix} \quad (8.24)$$

El cambio de fase de una onda circularmente polarizada $\Delta\Phi$ y la correspondiente rotación de ángulo $\Delta\alpha$ es proporcional a la relación de torsión τ , es decir, una fibra monomodo sometida a torsión de longitud l_f , se comporta como un rotador de polarización con ángulo de rotación

$$\Delta\alpha = g\tau l_f \quad (8.25)$$

Para realizar las medidas experimentales sometiendo a la mPOF a torsión, se ha utilizado el montaje de la Figura 8.4. En dichas medidas se acopla la luz, en el eje lento de la fibra x_f , (ver sección 8.2.1) y a continuación, se rota la fibra.

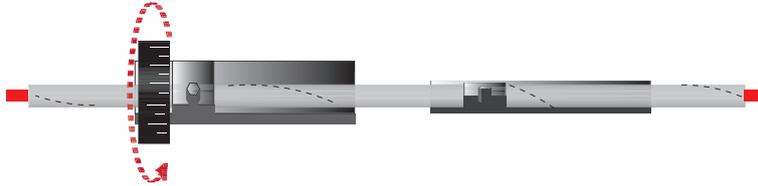


Figura 8.12: Sistema de rotación de la fibra.

En este experimento, hemos empleado una muestra de mPOF de 90 cm. Las medidas se han repetido tres veces y en las mismas condiciones. Una vez finalizado el proceso de medidas se ha cortado la muestra y se han repetido las medidas con una longitud de 47 cm.

En la figura 8.12 se muestra una ilustración del sistema que se ha utilizado para rotar la fibra.

Capítulo 9

Medidas y Resultados

9.1. Resultados de la Determinación de los Ejes Ópticos

Una vez acoplada la luz en la fibra, tal y como se muestra en la Figura 8.1. La polarización de la luz, a la salida de la fibra, se puede monitorizar mediante el polarímetro. La Figura 9.1 muestra un ejemplo.

Después de aplicar el método explicado en la sección 8.2.1, se obtiene que $\xi = 47,2^\circ$ y $\theta - \Phi = 88,5^\circ$. Donde ξ es el ángulo formado entre la dirección del eje rápido de la lámina $\lambda/4$ y la dirección de aceptación del polarizador de salida, θ es el ángulo de la polarización (lineal) a la entrada, respecto del eje lento de la mPOF y Φ es el ángulo de la dirección del semieje mayor de la elipse de polarización a la salida, respecto del eje lento de la mPOF.

Resolviendo el sistema formado por las ecuaciones 6.6 y 6.7, obtenemos el ángulo θ , que es el formado entre el eje lento de la fibra x_f y el eje del sistema de referencia x_{lab} . Para este caso, $\theta = 225^\circ$. Por lo tanto, para acoplar la luz por el eje lento de la fibra, se corrige, rotando el polarizador de entrada -225° .

Una vez realizada esta acción, la luz está acoplada por el eje x_f de la fibra, tal y como se puede ver en la Figura 9.2, y por lo tanto, polarizada linealmente.

Se han realizado dos medidas más, y bajo las mismas condiciones, cada una de ellas con una muestra diferente de fibra. La polarización de la luz, a la salida de la misma, en la segunda medida, se puede ver en la Figura 9.3.

Después de realizar los cálculos, se obtiene que $\xi = 29,38$ y $\theta - \Phi = -150,53$ y resolviendo el sistema de ecuaciones 6.6 y 6.7, tenemos que $\theta = 29,38^\circ$.

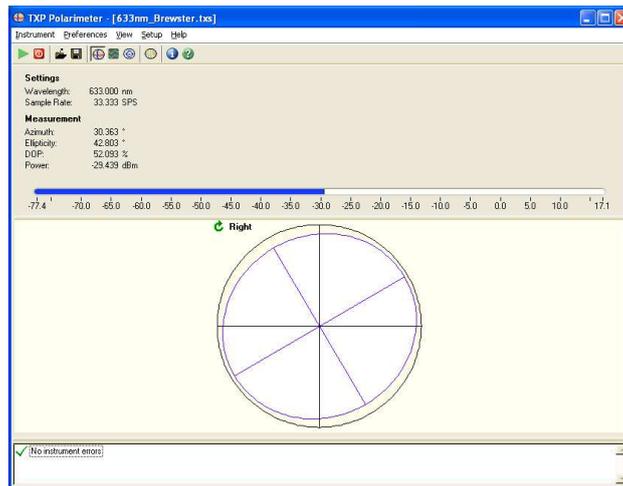


Figura 9.1: Polarización de la luz a la salida de la fibra. Medida 1.

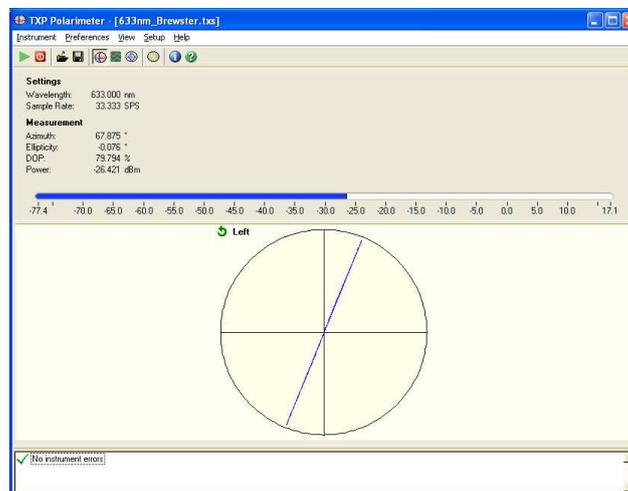


Figura 9.2: Polarización de la luz una vez corregido el ángulo θ . Medida 1.

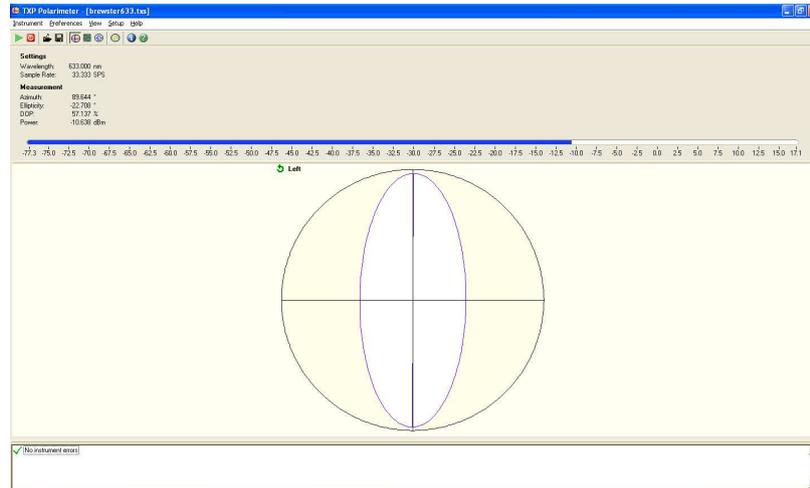


Figura 9.3: Polarización de la luz a la salida de la fibra. Medida 2.

En la Figura 9.4 se puede ver la imagen de la polarización de la luz a la salida de la fibra, una vez corregido $-29,38^\circ$ el ángulo θ .

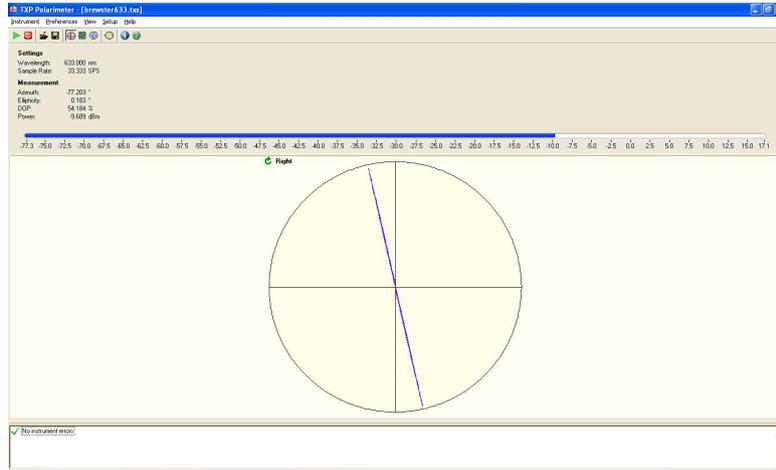


Figura 9.4: Polarización de la luz una vez corregido el ángulo θ . Medida 2.

De la misma forma que en las medidas anteriores, para la tercera medida se obtienen los siguientes resultados: $\xi = 59,36^\circ$, $\theta - \Phi = 28,58^\circ$ y después de resolver el sistema de ecuaciones 6.6 y 6.7, tenemos que $\theta = 212^\circ$. En las Figuras 9.5 y 9.6 se puede ver la polarización de la luz antes y después de aplicar la corrección del ángulo θ .

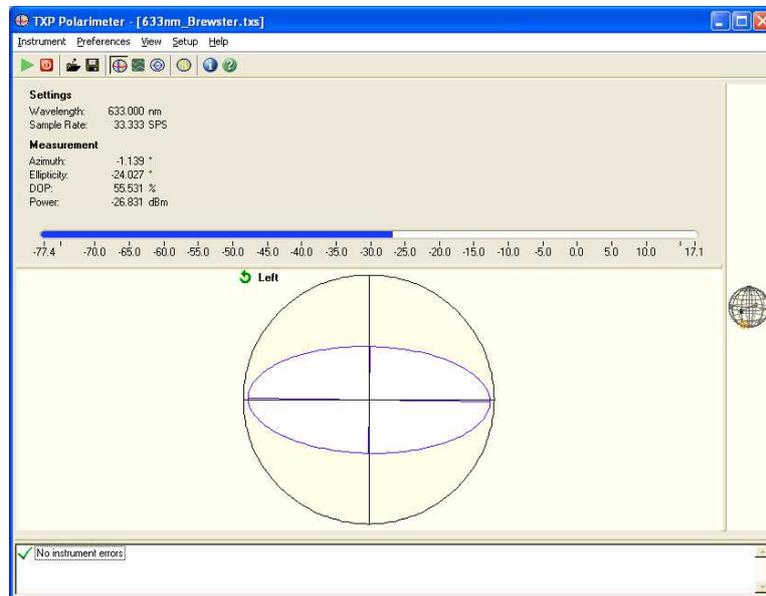


Figura 9.5: Polarización de la luz a la salida de la fibra. Medida 3.

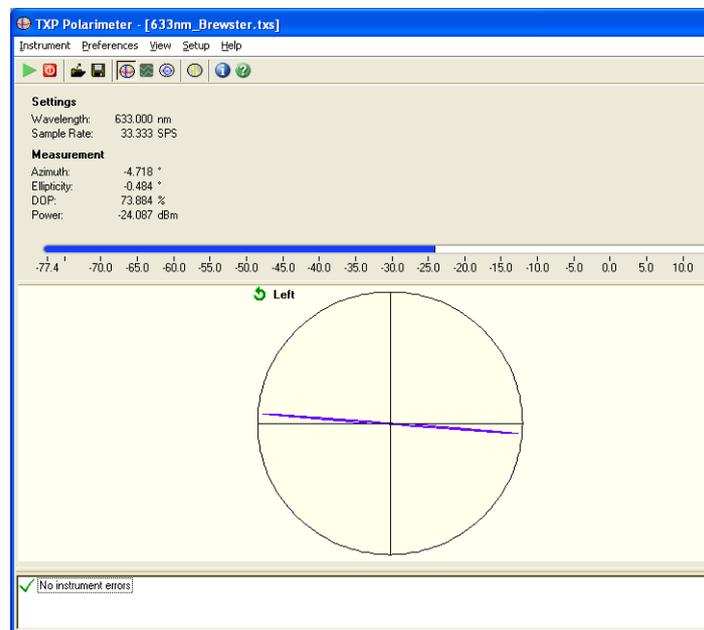


Figura 9.6: Polarización de la luz una vez corregido el ángulo θ . Medida 3.

9.2. Resultados de la Medida de la Longitud de Batido

Para determinar cual es la longitud de batido de la fibra se ha realizado el montaje de la Figura 8.2 y se ha llevado a cabo el procedimiento explicado en la sección 8.2.2.

En la Figura 9.7 se muestra una gráfica donde se puede ver la variación tanto del azimut como de la elipticidad, a lo largo de la longitud de batido de la fibra.

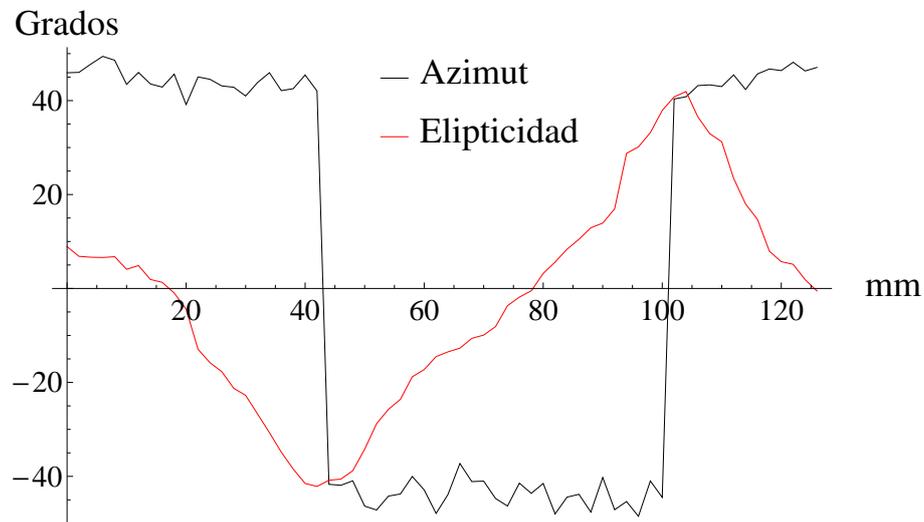


Figura 9.7: Variación del azimut y la elipticidad a lo largo de la longitud de batido.

En la gráfica se aprecia que los cambios de azimut y elipticidad, coinciden con el comportamiento teórico mostrado en la Figura 8.6. El rizado que se aprecia en la gráfica relativo al azimut, es debido a la ligera manipulación de la fibra para efectuar los cortes.

En la Figura 9.2 se muestran las imágenes más representativas de la evolución de la polarización a lo largo de una longitud de batido, obtenidas por medio del polarímetro.

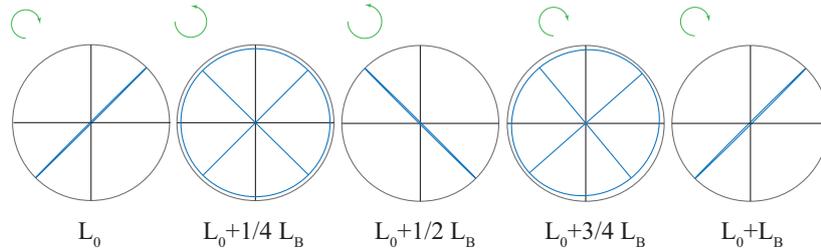


Figura 9.8: Evolución de la polarización a lo largo de una longitud de batido.

A partir de estos datos podemos obtener el la diferencia entre índices de refracción Δn de la siguiente forma: el desfase δ producido por dicha diferencia será:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \quad (9.1)$$

Cuando la polarización sea circular, el desfase δ será $\frac{\pi}{2}$ la longitud L correspondiente a ese desfase será $\approx 25mm$. Despejando de 9.1 tenemos que:

$$\Delta n = \frac{\delta \lambda}{2\pi L} = \frac{\frac{\pi}{2} * 632,8 * 10^{-6}}{2\pi * 0,025} = 6,328 * 10^{-6}$$

9.3. Resultados del Efecto de la Curvatura en la mPOF

Para medir el efecto causado por curvatura inducida en la mPOF se ha realizado el montaje experimental mostrado en la Figura 8.3 y se ha llevado a cabo, tal y como esta explicado en la sección 8.2.3.

Las medidas, han sido repetidas tres veces y los resultados obtenidos se muestran en la gráfica de la Figura 9.9. El eje de abscisas, mediante k , se representa el inverso de los radios de curvatura elevado al cuadrado y en el eje de ordenadas, la variación del índice de refracción inducida por la curvatura multiplicado por el desfase. La gráfica, aporta barra de errores y el ajuste de una recta por mínimos cuadrados, pudiéndose apreciar que dicho producto $(\Delta_n \beta)$, obedece a un comportamiento prácticamente lineal. Además, estas pequeñas diferencias entre medidas, pueden deberse a la manipulación de la fibra entre repeticiones,

ya que entre ellas, se ha repetido el proceso completo, es decir, desde la determinación de los ejes ópticos. Esta manipulación, aunque se ha realizado con sumo cuidado, siempre causa una pequeña diferencia entre medidas.

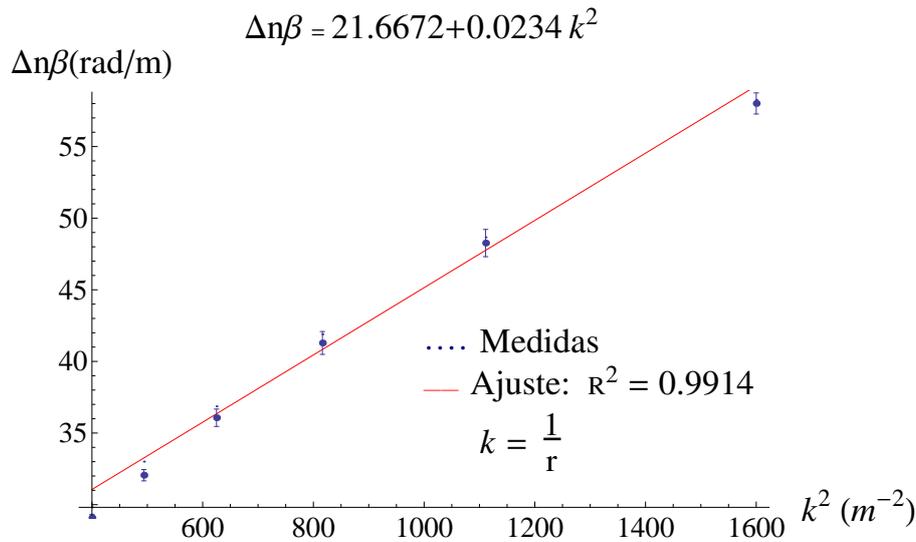


Figura 9.9: Resultados de las medidas de birrefringencia inducida por curvatura.

9.4. Resultados del Efecto de la Torsión en la mPOF

Para realizar las medidas cuando la fibra es sometida al efecto de la torsión, se ha realizado el montaje de la Figura 8.4. El procedimiento para efectuar dichas medidas se ha explicado en la sección 8.2.4.

En la Figura 9.10 se muestra la gráfica de tres medidas, que enfrenta el ángulo de la rotación que causa la torsión en la fibra, δ contra el ángulo de salida de la polarización Φ , para una longitud de fibra l_f de 90cm.

En la Figura 9.11 se muestra la misma gráfica pero, esta vez, para una longitud de fibra l_f de 47cm.

En la Figura 9.12, se muestra una gráfica comparando las medidas con diferente longitud de fibra. En ella, se aprecia la linealidad del comportamiento

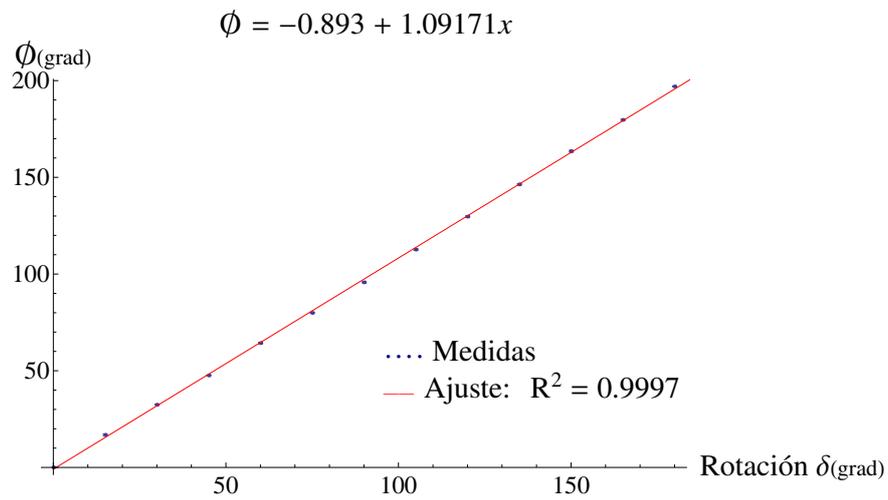


Figura 9.10: Torsión contra ángulo de salida de la polarización para una longitud de fibra de 90cm. Tres medidas con barras de error.

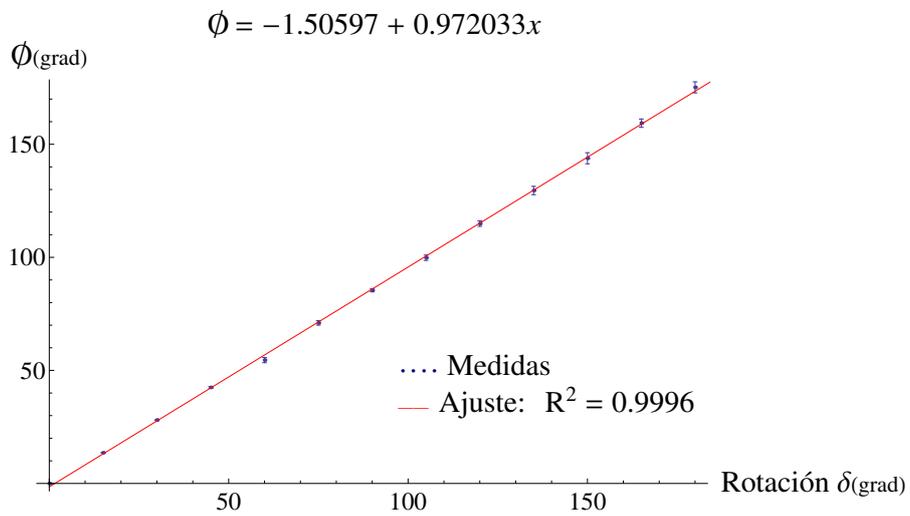


Figura 9.11: Torsión contra ángulo de salida de la polarización para una longitud de fibra de 47cm. Tres medidas con barras de error.

del ángulo de polarización a la salida de la fibra, con el ángulo de rotación y proporcional a la longitud de la fibra, tal y como predice la ecuación 8.25. En el anexo B.2 se aporta la demostración matemática de la rotación.

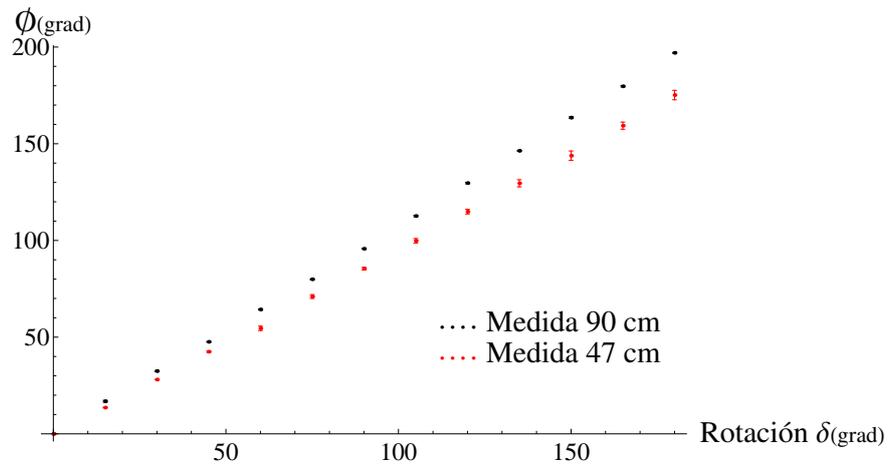


Figura 9.12: Comparativa de torsión contra ángulo de salida de la polarización, entre longitudes de 90 y 47 cm.

Capítulo 10

Conclusiones Finales

Antes de iniciar este proyecto, se barajaron diferentes alternativas para diseñar un dispositivo de sensado. Analizando las propiedades ópticas de la luz, decidimos estudiar la polarización en las mPOFs.

A medida que hemos avanzado en el estudio, hemos ido descubriendo como es el comportamiento de la polarización de la luz, cuando la mPOF es sometida a distintos efectos físicos como curvatura o torsión, dándonos cuenta de que es ideal para diseñar dispositivos de sensado.

De las diferentes medidas experimentales y estudios teóricos realizados se puede concluir que:

- La mPOF tiene baja birrefringencia.
- La polarización es extremadamente sensible a los cambios físicos sometidos a la mPOF. En particular a curvaturas y torsión.
- Existe alta repetibilidad en las medidas y entre diferentes muestras.

Anexos

Anexo A

Determinación de los Ejes Ópticos

A.1. Análisis Matemático

En este apartado, vamos a analizar matemáticamente las ecuaciones 6.6, 6.7 y 6.8, que conducen a determinar la orientación de los ejes ópticos de una mPOF.

En la Figura A.1, se representa una ilustración con las variables que aparecen en las ecuaciones mencionadas para calcular la posición de los ejes ópticos. Donde P_+ representa la dirección del eje de aceptación del polarizador de la salida y P_- la dirección del eje de aceptación del polarizador situado a la entrada de la mPOF, $f_{\lambda/4}$ y $s_{\lambda/4}$ son el eje rápido y lento de la lámina $\lambda/4$ respectivamente, ξ_1 es el ángulo formado entre el eje rápido de la lámina $\lambda/4$ y el eje aceptación del polarizador de la salida, ξ_2 es el ángulo formado entre el eje rápido de la lámina $\lambda/4$ y el eje aceptación del polarizador de la entrada y Φ el ángulo formado entre el eje x y el eje lento de la fibra.

Los ejes de la lámina $\lambda/4$ están alineados con el semieje mayor y pequeño de la elipse de polarización. En el caso de la Figura A.1, el eje lento $s_{\lambda/4}$ de la misma, es paralelo al semieje mayor.

El campo eléctrico \vec{E} a la salida de la fibra, generalmente, será de la forma:

$$\vec{E} = E_1 \hat{e}_1 \pm j E_2 \hat{e}_2 \quad E_1, E_2 \in \mathfrak{R}$$

Una vez, que el campo eléctrico haya atravesado la lámina $\lambda/4$, tendremos:

$$\begin{aligned}\vec{E}' &= E_1 e^{jk_s d} \hat{e}_1 \pm j E_2 e^{jk_f d} \hat{e}_2 \propto E_1 \hat{e}_1 \pm j E_2 e^{j(k_f - k_s)d} \hat{e}_2 \\ &\propto E_1 \hat{e}_1 \pm j E_2 e^{-j\pi/2} \hat{e}_2 = E_1 \hat{e}_1 \pm E_2 \hat{e}_2\end{aligned}$$

Donde $k_s = \frac{2\pi}{\lambda} n_s$ y $k_f = \frac{2\pi}{\lambda} n_f$, siendo n_s , n_f y d los índices de refracción (sección 2.1) de los ejes lento, rápido y espesor de la lámina $\lambda/4$, respectivamente.

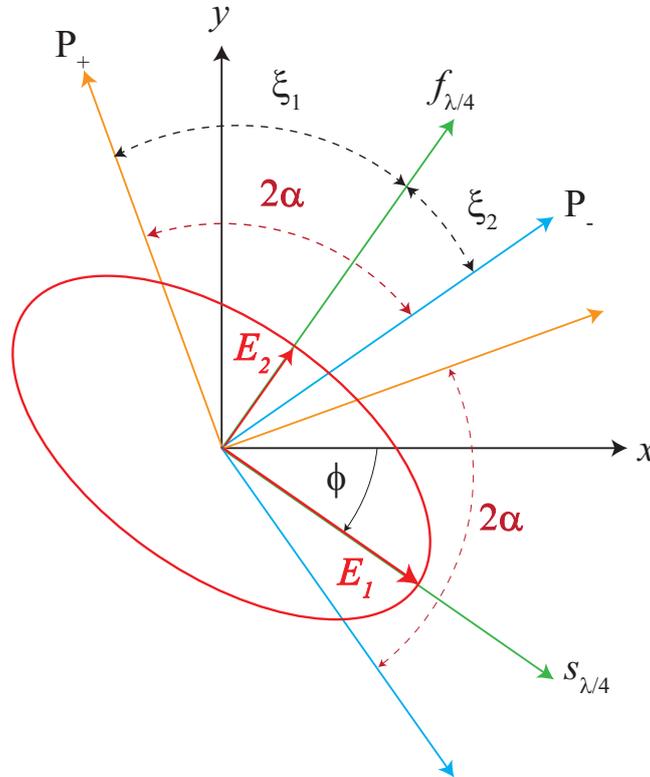
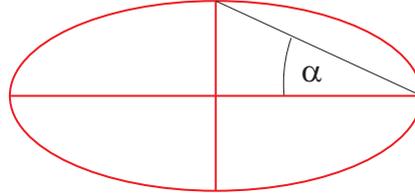


Figura A.1: Disposición geométrica de las variables para el cálculo de los ejes ópticos, cuando el semieje mayor de la elipse está alineado con el eje lento de la lámina $\lambda/4$.

En la Figura A.2 se ilustra el parámetro α que define la elipticidad.



α – Elipticidad

$$\alpha = \text{Arctg} \left(\frac{|E_2|}{|E_1|} \right)$$

Figura A.2: Ilustración del parámetro de la elipticidad α .

En nuestro caso, el montaje experimental, se ha realizado alineando el semi-eje mayor de la elipse con el eje rápido de la lámina $\lambda/4$, tal y como se representa en la Figura 8.5. Recordamos que el ángulo ξ que aparece en la ecuación 6.8, es el formado entre el eje rápido de lámina $\lambda/4$ y la dirección del eje de aceptación del polarizador de salida. En la Figura A.3, se puede ver la disposición de los ángulos para esta configuración del montaje experimental.

Entonces tenemos que:

$$\left. \begin{array}{l} \xi'_1 = \frac{\pi}{2} - \xi_2 \\ \xi'_2 = \frac{\pi}{2} + \xi_1 \end{array} \right\} \rightarrow \xi'_2 - \xi'_1 = \xi_2 + \xi_1$$

$$\cos(2\xi'_1) = \cos \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \xi_2 \right) \right] = -\cos(2\xi_2) = -\cos[2(2\alpha - \xi_1)]$$

Por lo tanto:

$$\cos(2\xi_1) = \cos(2\xi'_1)$$

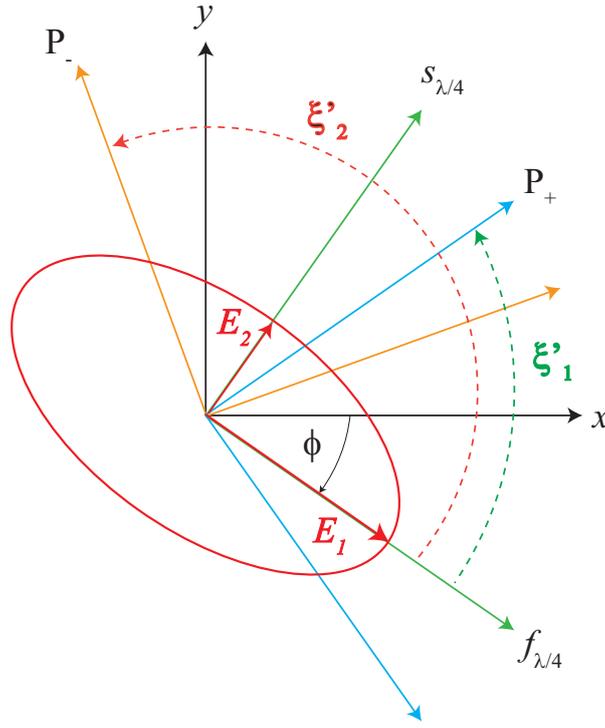


Figura A.3: Definición de las variables para el cálculo de los ejes ópticos, cuando el semieje mayor de la elipse está alineado con el eje rápido de la lámina $\lambda/4$.

A continuación, vamos a analizar las ecuaciones 6.6 y 6.7. Para ello vamos a recordar la ecuación 6.4, y el parámetro de elipticidad P (ecuación 6.5), respectivamente:

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

$$P = \frac{(|E_1|^2 - |E_2|^2)}{(|E_1|^2 + |E_2|^2)}$$

Desarrollando sus componentes, tenemos que:

$$|E_1|^2 = E_1 \cdot E_1^* = (\cos \phi E_x + \sin \phi E_y) (\cos \phi E_x^* + \sin \phi E_y^*)$$

$$= \cos^2 \Phi |E_x|^2 + \sin^2 \Phi |E_y|^2 + \cos \Phi \sin \Phi (E_x E_y^* + E_x^* E_y)$$

y

$$\begin{aligned} |E_2|^2 &= E_2 \cdot E_2^* = (-\sin \Phi E_x + \cos \Phi E_y) (-\sin \Phi E_x^* + \cos \Phi E_y^*) \\ &= \sin^2 \Phi |E_x|^2 + \cos^2 \Phi |E_y|^2 - \sin \Phi \cos \Phi (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \end{aligned}$$

Desarrollamos la expresión:

$$\begin{aligned} |E_1|^2 - |E_2|^2 &= \cos 2\Phi |E_x|^2 - \cos 2\Phi |E_y|^2 + 2 \sin \Phi \cos \Phi (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \\ &= \cos 2\Phi |E_x|^2 - \cos 2\Phi |E_y|^2 + \sin 2\Phi (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \\ &= \cos 2\Phi (|E_x|^2 - |E_y|^2) + \sin 2\Phi (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \end{aligned}$$

Hacemos la relación:

$$\begin{aligned} |E_1|^2 + |E_2|^2 &= |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 &= e^{j\frac{\delta}{2}} \cos \theta E_0 e^{-j\frac{\delta}{2}} \cos \theta E_0^* = \cos^2 \theta |E_0|^2 \\ |E_y|^2 &= e^{-j\frac{\delta}{2}} \sin \theta E_0 e^{j\frac{\delta}{2}} \sin \theta E_0^* = \sin^2 \theta |E_0|^2 \\ |E_x|^2 + |E_y|^2 &= |E_0|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 &= \cos 2\theta |E_0|^2 \\ E_x E_y^* &= e^{-j\frac{\delta}{2}} \cos \theta E_0 e^{j\frac{\delta}{2}} \sin \theta E_0^* = e^{j\delta} \sin \theta \cos \theta |E_0|^2 \\ E_x^* E_y &= e^{-j\frac{\delta}{2}} \cos \theta E_0 e^{-j\frac{\delta}{2}} \sin \theta E_0^* = e^{-j\delta} \sin \theta \cos \theta |E_0|^2 \\ E_x E_y^* + E_x^* E_y &= \sin \theta \cos \theta |E_0|^2 2 \cos \delta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |E_1|^2 + |E_2|^2 &= |E_0|^2 \\ |E_1|^2 - |E_2|^2 &= \cos 2\Phi \cos 2\theta |E_0|^2 + \sin 2\Phi \sin 2\theta \cos \delta |E_0|^2 \\ &= |E_0|^2 (\cos 2\Phi \cos 2\theta + \sin 2\Phi \sin 2\theta \cos \delta) \end{aligned}$$

Sustituyendo en 6.5 tenemos que:

$$P = \cos 2\Phi \cos 2\theta + \sin 2\Phi \sin 2\theta \cos \delta$$

Donde δ es el desfase entre los campos eléctricos, en un medio con birrefringencia lineal, θ es el ángulo formado entre la dirección de la polarización del haz de luz, a la entrada (lineal) y el eje x y Φ el ángulo formado por la dirección del semieje mayor de la elipse y el eje x .

$$\begin{aligned} P^2 &= (\cos 2\Phi \cos 2\theta)^2 + (\sin 2\Phi \sin 2\theta \cos \delta)^2 + 2 \cos \delta \sin 2\Phi \cos 2\Phi \sin 2\theta \cos 2\theta \\ &= \cos^2 2\theta + \cos^2 \delta \sin^2 2\theta - \sin^2 2\theta \cos^2 2\theta - \cos^2 \delta \cos^2 2\Phi \sin^2 2\theta \\ &\quad + 2 \cos \delta \sin 2\Phi \cos 2\Phi \sin 2\theta \cos 2\theta \end{aligned}$$

$$P^2 = \cos^2 2\theta \cos^2 \delta \sin^2 2\theta - (\sin 2\Phi \cos 2\theta - \cos \delta \cos 2\Phi \sin 2\theta)^2$$

Tendremos polarización lineal si:

$$P = 1 \quad \delta = \pm m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\begin{aligned} P^2 &= \cos^2 2\theta \cos^2 \delta \sin^2 2\theta - (\sin 2\Phi \cos 2\theta - (1)^m \cos 2\Phi \sin 2\theta)^2 \\ &= 1 - \underbrace{\sin^2 [2\Phi + (-1)^{m+1}\theta]}_{\substack{\Phi=\theta \quad m=2k(k=1,2,3,\dots); \\ \Phi=-\theta \quad m=2k+1(k=1,2,3,\dots)}} = 1 \end{aligned}$$

Tendremos polarización circular si:

$$P = 0; \quad \delta = \pm \frac{\pi}{2}; \quad \theta = \frac{\pi}{4}$$

$$P^2 = \cos^2 2\theta - \sin^2 2\Phi \cos^2 2\theta \neq 0$$

$$0 \neq \theta \neq \frac{\pi}{4} \rightarrow P^2 = \cos^2 2\theta \cos^2 2\Phi \underset{\Phi=0,\pi}{=} \cos^2 2\theta \neq 0$$

En general

$$\sin 2\Phi \cos \theta - \cos \delta \cos 2\Phi \sin \theta = 0$$

$$\boxed{\tan 2\Phi = \cos \delta \tan 2\theta}$$

$$\boxed{P^2 = \cos^2 2\theta + \cos^2 \delta \sin^2 2\theta}$$

Partiendo de la ecuación 6.5

$$\cos^2 \alpha = \left(\frac{|E_1|}{\sqrt{|E_1|^2 + |E_2|^2}} \right)^2$$

$$\sin^2 \alpha = \left(\frac{|E_2|}{\sqrt{|E_1|^2 + |E_2|^2}} \right)^2$$

$$\cos^2 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = P^2$$

$$\xi - \alpha = \frac{\pi}{2} \rightarrow \cos 2\alpha = \cos \left[2 \left(\xi - \frac{\pi}{2} \right) \right] = \cos(2\xi - \pi) = -\cos 2\xi$$

$$\boxed{P^2 = \cos^2 2\xi}$$

Anexo B

Birrefringencia

B.1. Análisis de la Birrefringencia Lineal en una Fibra

En este apartado vamos a analizar la polarización de la luz a medida que se propaga por un medio que tiene birrefringencia lineal.

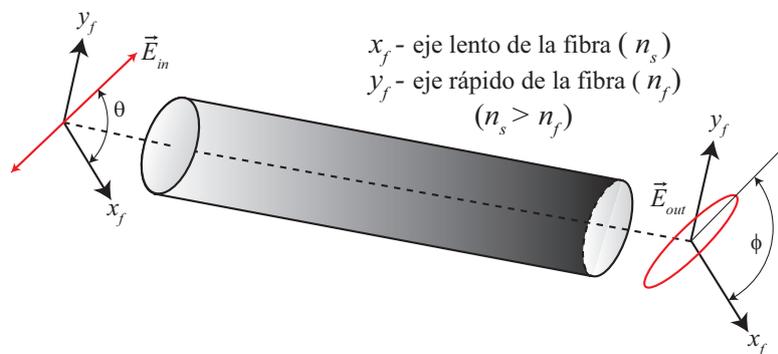


Figura B.1: Cambio de la polarización de la luz, al atravesar una fibra con birrefringencia lineal.

El campo eléctrico de un haz de luz linealmente polarizado, a la entrada de la fibra será:

$$\vec{E}_{in} = E_{in} (\cos \theta \hat{x}_f + \sin \theta \hat{y}_f)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_{out} &= E_{in} (\cos \theta e^{jk_s L} \hat{x}_f + j \sin \theta e^{jk_s L} \hat{y}_f) \\ &= E_{in} e^{jk_f L} \left(\cos \theta e^{2\pi \frac{n_s - n_f}{\lambda} L} \hat{x}_f + j \sin \theta \hat{y}_f \right) \end{aligned}$$

Donde θ es el angulo formado por la direcci3n de la polarizaci3n de la luz a la entrada de la fibra, $k_s = \frac{2\pi}{\lambda} n_s$ y $k_f = \frac{2\pi}{\lambda} n_f$. Los par3metros n_s y n_f son los indices de refracci3n (secci3n 2.1) de los ejes lento y r3pido de la fibra, respectivamente.

A la salida de la fibra, para determinar la orientaci3n y elipticidad se calculan los vectores \vec{b}_1 y \vec{b}_2 .

Procedimiento para el c3lculo de \vec{b}_1 y \vec{b}_2

$$\vec{E}_{out} \cdot \vec{E}_{out} = |\vec{E}_{out}|^2 e^{2j\Phi}$$

donde:

$$\text{tg}(2\Phi) = \frac{2\vec{E}_{or} \cdot \vec{E}_{oi}}{\vec{E}_{or} \cdot \vec{E}_{or} + \vec{E}_{oi} \cdot \vec{E}_{oi}}$$

Adem3s

$$\begin{aligned} \text{tg } 2\Phi &= \frac{2 \cos^2 \theta \cos \left(\frac{\Delta n}{c} L \right)}{\cos^2 \theta \cos^2 \left(\frac{\Delta n}{c} L \right) + \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{c} L \right)} = \\ &= \frac{\cos^2 \theta \sin \left(2 \frac{\Delta n}{c} L \right)}{\cos^2 \theta \left[\cos^2 \left(\frac{\Delta n}{c} L \right) - \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{c} L \right) \right] + \sin^2 \theta} = \\ &= \frac{\sin \left(2 \frac{\Delta n}{c} L \right) \cos^2 \theta}{1 - \cos^2 \theta \left[1 - \cos \left(2 \frac{\Delta n}{c} L \right) \right]} = \end{aligned}$$

$$\frac{\cos^2 \theta \sin \left(2 \frac{\Delta n}{c} L \right)}{1 - 2 \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{c} L \right) \cos^2 \theta}$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{b}_1 &= \vec{E}_{out,r} \cos \Psi + \vec{E}_{out,i} \sin \Psi \\ \vec{b}_2 &= \vec{E}_{out,r} \sin \Psi + \vec{E}_{out,i} \cos \Psi \end{aligned} \right\} |\vec{b}_1| \geq |\vec{b}_2| \quad (\text{B.1})$$

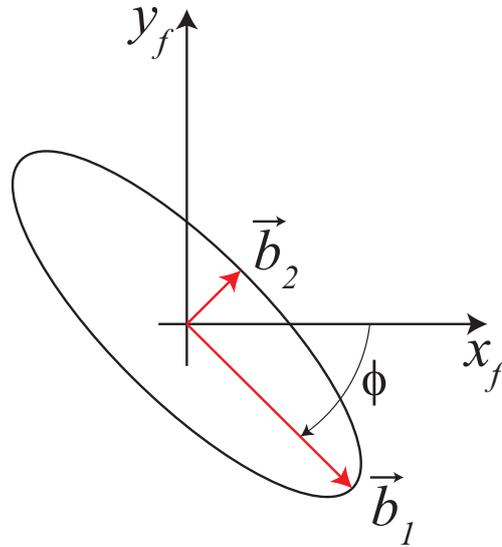


Figura B.2: Vectores b_1 y b_2 de la elipse de polarización

B.2. Análisis de la Birrefringencia Circular en una Fibra

En este apartado vamos a analizar la polarización de la luz a medida que se propaga por un medio que tiene polarización circular.

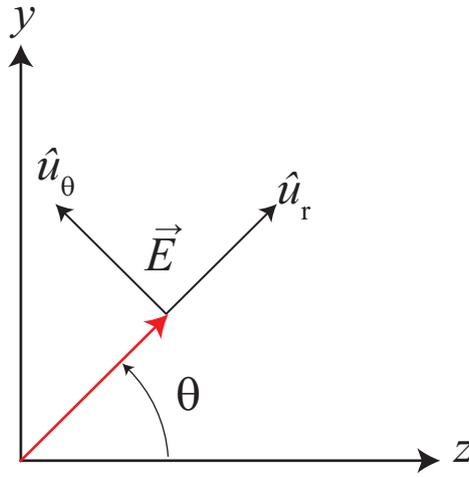


Figura B.3:

Para $\theta = 45^\circ$ vector unitario \hat{u}_θ será:

$$\hat{u}_\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{x} + \hat{y})$$

Para simplificar el análisis matemático, partiremos de la expresión que define el campo eléctrico \vec{E} , como una onda con polarización circular.

$$\vec{E}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{u}_r + j\hat{u}_\theta) + \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{u}_r - j\hat{u}_\theta)$$

En un medio con birrefringencia circular, como es la mPOF cuando es sometida a torsión, a la salida de la misma tendremos que:

$$\vec{E}_{out}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{u}_r + j\hat{u}_\theta) e^{jn+k_oL} + \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{u}_r - j\hat{u}_\theta) e^{jn-k_oL}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{jn_+k_oL} + e^{jn_-k_oL}) \hat{u}_r + \frac{j}{\sqrt{2}} (e^{jn_+k_oL} - e^{jn_-k_oL}) \hat{u}_\theta \\
&= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{j\frac{n_+ + n_-}{2}k_oL} \left(e^{j\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL} + e^{-j\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL} \right) \hat{u}_r \\
&\quad + \frac{j}{\sqrt{2}} e^{j\frac{n_+ + n_-}{2}k_oL} \left(e^{j\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL} - e^{-j\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL} \right) \hat{u}_\theta \\
&= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL} \left\{ 2 \cos \left(\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL \right) \hat{u}_r - 2 \sin \left(\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL \right) \hat{u}_\theta \right\}
\end{aligned}$$

Donde n_+ y n_- son los índices de refracción de la fibra para una polarización circular en sentido derecho e izquierdo respectivamente.

Por lo tanto, el campo a la salida de un medio con birrefringencia circular será de la forma que se muestra en la expresión B.2.

$$\boxed{\vec{E}_{out}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL} \left\{ 2 \cos \left(\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL \right) \hat{u}_r - 2 \sin \left(\frac{n_+ - n_-}{2}k_oL \right) \hat{u}_\theta \right\}} \quad (\text{B.2})$$

Anexo C

Contribuciones a Congresos

Este trabajo a participado en diferentes congresos internacionales con las siguientes contribuciones:

1.
 - Título: "Polarisation Management in mPOFs for Sensing Applications"
 - Tipo de participación: Oral
 - Congreso: Optical Sensors and Cyber Physical Systems [28]
 - Publicación: Documentation laser optics Congress
 - Lugar de Celebración: Berlin, Alemania
 - Fecha: 03/2014
2.
 - Título: "Stress-based mechanisms in polymer mPOFs for fibre optic sensing"
 - Tipo de participación: Póster
 - Congreso: 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors OFS23 [29]
 - Lugar de Celebración: Santander, España
 - Fecha: 06/2014
3.
 - Título: "Probing polarisation from a single-mode microstructured polymer optical fibre for mass sensing"
 - Tipo de participación: Póster
 - Congreso: The 23rd International Conference on Plastic Optical Fibers [30]
 - Lugar de Celebración: Hiyoshi, Yokohama
 - Fecha: 10/2014

4.
 - Título: "Mechanical Sensing with Microstructured POF"
 - Tipo de participación: Charla invitada
 - Congreso: The 23rd International Conference on Plastic Optical Fibers [30]
 - Lugar de Celebración: Hiyoshi, Yokohama
 - Fecha: 10/2014

Anexo D

Plan de Trabajo

En este capítulo se incluye el plan de trabajo seguido durante la ejecución del proyecto. En el mismo, se detallan los diferentes paquetes de trabajo junto con sus unidades entregables y una serie de hitos de control. Además, para disponer de una imagen global de la duración del proyecto, se adjunta un diagrama de Gantt de actividades.

D.1. Grupo de Trabajo

Las figuras que han formado parte del proyecto son las siguientes:

- **Directores del proyecto** : Hay dos, uno es un profesor, catedrático de física (P0), y es el encargado de establecer los hitos de control y unidades entregables. El otro es un profesor doctorado en física (P1) y es el encargado de supervisar el proyecto.
- **Encargado de la elaboración (P2)**: Es un alumno de Ingeniería de Telecomunicaciones, el cual se encarga de analizar las alternativas al proyecto, la realización y análisis de las medidas y redactar los informes.

CAMPO DE DECISIÓN	P0	P1	P2
Gestión del proyecto	1, 2	1, 2	4
Definición de objetivos	1	1, 3	4
Unidades entregables	1	1, 3	2
Medidas experimentales	4	3, 4	2
Análisis de los resultados	4	4	2

Tabla D.1: Matriz de responsabilidades. 1:Decide; 2:Ejecuta; 3:Asesora; 4:Es informado.

D.2. Definición de Paquetes de Trabajo y Tareas

El proyecto se dividió en cuatro paquetes en total, con sus correspondientes sub-tareas y unidades entregables.

PT1	320h	P0, P1, P2	INICIO: Semana 1	FIN: Semana 12
NOMBRE				
OBJETIVO: Engloba recopilar y leer bibliografía sobre las fibras ópticas microestructuradas, polarización de la luz en general y en fibras ópticas en particular. También reunir información sobre el equipamiento necesario, tanto para realizar las medidas experimentales, como para su análisis.				
TAREAS				
<p>1. Lectura bibliografía: 200h; P2; INICIO: Semana 1; FIN: Semana 8; OBJETIVO: Lectura de bibliografía relacionada con la polarización de la luz y fibras ópticas microestructuradas, así como artículos de investigación relacionados con el estudio del comportamiento de las fibras ópticas cuando son sometidas a diferentes situaciones, tales como curvaturas o torsión.</p> <p>2. Elección del equipamiento experimental: 120h; P0, P1, P2; INICIO: Semana 8; FIN: Semana 8; OBJETIVO: Reunir información sobre el equipamiento necesario para realizar las medidas experimentales. Comprobar el material que tenemos disponible en el laboratorio y adquirir el que no tengamos disponible. El material que sea necesario comprar, compararlo entre los diferentes vendedores para conseguir el equipamiento mas moderno y a mejor precio.</p>				
ENTREGABLES				
UE1: Informe con los resultados de la elección de los parámetros a medir y los sistemas experimentales que se van a diseñar. UE2: Informe con el material disponible en el laboratorio y el que se necesita adquirir y de éstos, la mejor elección comercial.				
HITOS				
-				

Tabla D.2: Paquete de trabajo 1. Preparación previa.

PT2	80h	P2	INICIO: Semana 13	FIN: Semana 15
NOMBRE: Montaje general del sistema óptico de medidas.				
OBJETIVO: Realizar el montaje con todos los elementos necesarios para realizar las medidas, así como realizar una perfecta calibración de los elementos ópticos (lentes, espejos, objetivos ópticos, etc.				
TAREAS				
1. Montaje del sistema experimental de medidas: 50h; P2; INICIO: Semana 13; FIN: Semana 14. OBJETIVO: Realizar la disposición de todos los elementos que van a formar parte del sistema de medidas experimental, sobre la mesa óptica del laboratorio.				
2. Calibrar los elementos ópticos: 30h; P2; INICIO: Semana 14; FIN: Semana 15. OBJETIVO: Realizar una minuciosa calibración de todos los elementos ópticos con el fin de realizar las medidas experimentales con la máxima precisión.				
ENTREGABLES				
UE3: Informe con los resultados del montaje experimental.				
HITOS				
H1: Reunión con los directores del proyecto.				

Tabla D.3: Paquete de trabajo 2. Realización del montaje experimental.

PT3	110h	P1, P2	INICIO: Semana 16	FIN: Semana 20
NOMBRE: Determinación de los ejes ópticos.				
OBJETIVO: Realizar las medidas experimentales y realizar los cálculos necesarios para determinar la posición de los ejes óptico de la mPOF.				
TAREAS				
1. Acoplamiento de la luz a la mPOF y medidas: 70h; P2; INICIO: Semana 16; FIN: Semana 18. OBJETIVO: Realizar el montaje del sistema de lanzamiento de luz para acoplar la luz a la mPOF y realizar las medidas necesarias para calcular la posición de los ejes ópticos de la mPOF.				
2. Calculos matemáticos: 40h; P2; INICIO: Semana 19; FIN: Semana 20. OBJETIVO: Realizar los cálculos matemáticos para calcular el valor de los parámetros que nos permitan conocer la disposición física de los ejes ópticos.				
ENTREGABLES				
UE4: Informe con los resultados de las medidas de la determinación de los ejes ópticos.				
HITOS				
-				

Tabla D.4: Paquete de trabajo 3. Determinación de los ejes ópticos de la mPOF.

PT4	320h	P1, P2	INICIO: Semana 27	FIN: Semana 39
NOMBRE: Caracterización de la mPOF.				
OBJETIVO: Medir la longitud de batido de la mPOF y realizar medidas experimentales para estudiar el comportamiento de la polarización de la luz, cuando la mPOF es sometida a curvatura y torsión.				
TAREAS				
<p>1. Medir la longitud de batido:100h; P2; INICIO: Semana 27; FIN:Semana 31. OBJETIVO: Realizar los cambios necesarios en el montaje experimental para realizar con máxima precisión la medida de la longitud de batido.</p> <p>2. Estudiar el comportamiento de la polarización cuando la mPOF es sometida a curvatura:110h;P1, P2; INICIO: Semana 32; FIN:Semana 36. OBJETIVO:Realizar los cambios necesarios en el montaje experimental para realizar con máxima precisión la medidas experimentales cuando la mPOF es sometida a diferentes curvaturas y analizarlas matemáticamente.</p> <p>3. Estudiar el comportamiento de la polarización cuando la mPOF es sometida a torsión:110h;P1, P2; INICIO: Semana 36; FIN:Semana 39.</p>				
ENTREGABLES				
<p>UE5:Informe con los resultados de la medida de la longitud de batido. UE6:Informe con los resultados de las medidas y análisis de la mPOF cuando es sometida a diferentes curvaturas. UE7:Informe con los resultados de las medidas y análisis de la mPOF cuando es sometida a torsión.</p>				
HITOS				
Reunión con los directores del proyecto				

Tabla D.5: Paquete de trabajo 4. Caracterización de la mPOF.

PT5	100h	P0,P1, P2	INICIO: Semana 40	FIN: Semana 44
NOMBRE: Análisis y conclusiones.				
OBJETIVO: Analizar los resultados obtenidos en los paquetes anteriores y extraer conclusiones				
TAREAS				
-				
ENTREGABLES				
UE8: Informe final con los resultados y conclusiones obtenidos del estudio.				
HITOS				
-				

Tabla D.6: Paquete de trabajo 5. Análisis y conclusiones.

D.3. Hitos de Control

Para llevar a cabo el seguimiento y control del proyecto, fue necesario realizar una serie de reuniones con los directores del proyecto, con el objetivo de asegurar el cumplimiento los objetivos propuestos.

En la siguiente tabla se recogen los diferentes hitos que se propusieron durante la fase de planificación del proyecto:

Descriptor	Nombre	Fecha
H1	Reunión con los directores del proyecto	Semana 15
H2	Reunión con los directores del proyecto	Semana 39

Tabla D.7: Hitos de control.

D.3.1. Descripción de los Hitos de Control

- **H1 Reunión con los directores del proyecto.** En esta reunión se informó al director principal del proyecto acerca de los avances hasta la fecha. Se validaron los resultados obtenidos hasta ese punto y repasó la línea a seguir.
- **H2 Reunión con los directores del proyecto.** En esta reunión se informó al director principal del proyecto, sobre los resultados experimentales y análisis obtenidos de los mismos. Se validaron los resultados obtenidos.

D.4. Unidades Entregables

A lo largo de la realización del proyecto, se fijó la entrega de una serie de unidades entregables a modo de informes de resultados de los paquetes de trabajo. Éstas se entregaron a los directores del proyecto, con el fin de que éste pudiese valorar los avances del proyecto, tal y como se especificó en la matriz de responsabilidades.

Entregable	Descripción
UE1	Informe: Elección de parámetros a estudiar en la mPOF
UE2	Informe: Equipamiento necesario para el estudio
UE3	Informe: Resultados del montaje experimental
UE4	Informe: Resultados de la determinación de los ejes opticos
UE5	Informe: Resultados de la medida de la longitud de batido
UE6	Informe: Resultados de análisis de la curvatura en la mPOF
UE7	Informe: Resultados de análisis de la torsión en la mPOF
UE8	Informe: Resultados finales del estudio

Tabla D.8: Unidades entregables.

D.5. Gantt de Actividades

En la Figura D.1 se muestra el Gantt de actividades con los hitos resaltados.

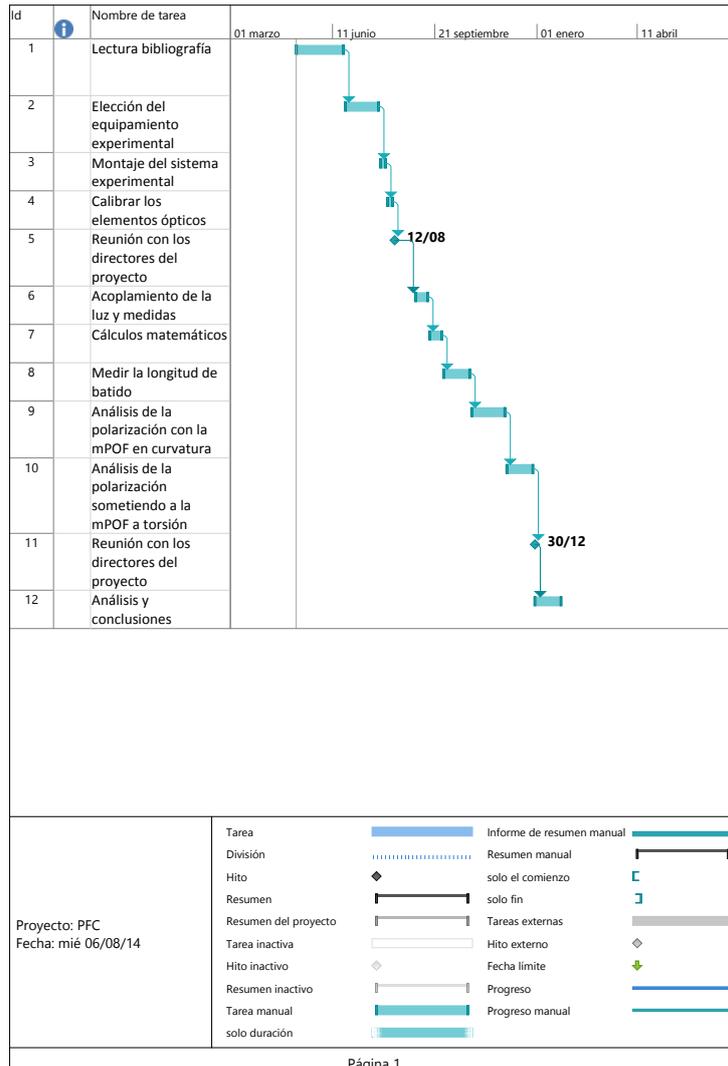


Figura D.1: Gantt de actividades.

D.6. Asignación de Recursos Humanos

En la siguiente tabla se resumen los recursos humanos empleados en el proyecto, tal y como se ha descrito en la sección D.2. En el total vertical se resumen las horas dedicadas a cada tarea, mientras que en el total horizontal se representan las horas totales dedicadas por cada participante.

Paquete	Tarea	P0	P1	P2	TOTAL
1	1	0	0	200	200
	2	2	2	116	120
2	1	0	0	50	50
	2	0	0	30	30
3	1	0	70	70	70
	2	0	2	40	40
4	1	0	0	100	100
	2	0	10	100	110
	3	0	10	100	110
5	1	45	45	10	100
	TOTAL	47	139	816	1002

Tabla D.9: Asignación de recursos humanos.

Anexo E

Coste del Proyecto

En este capítulo se detallará el coste de la realización del proyecto, en base a los datos presentados en el plan de trabajo.

E.1. Financiación

Este presupuesto está financiado por el Departamento de Ingeniería de Telecomunicaciones de la UPV/EHU.

E.2. Presupuesto de Recursos Humanos

En la siguiente tabla se resumen los costes €/h de cada uno de los integrantes del equipo del proyecto:

CÓDIGO	RESPONSABILIDAD	COSTE €/hora
P0	Director del proyecto (Catedrático)	40
P1	Director del proyecto (Doctor)	35
P2	Estudiante de Ingeniería	0

Tabla E.1: Precio unitario por mano de obra

Seguidamente se presentan los costes derivados de recursos humanos:

Coste de recursos humanos: seis mil setecientos cuarenta y cinco euros (6.745 €).

CÓDIGO	RESPONSABILIDAD	HORAS	COSTE (€)
P0	Dir. del proyecto (Catedrático)	47	1880
P1	Dir. del proyecto (Doctor)	139	4865
P2	Estudiante de Ingeniería	816	0
		TOTAL	6745

Tabla E.2: Presupuesto de recursos humanos

E.3. Presupuesto de Recursos Materiales

A la hora de presentar el presupuesto de los recursos materiales, se hace necesario diferenciar entre material fungible y material amortizable.

E.3.1. Material Fungible

Se trata del material que no puede ser reutilizado tras la ejecución del proyecto (E.3).

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	COSTE €/MES
MF1	Material se oficina	12

Tabla E.3: Precio unitario del material fungible.

E.3.2. Material Amortizable

Los recursos materiales amortizables son aquellos ya disponibles en el laboratorio, así como los de nueva adquisición. En la Tabla E.4 se resumen los costes unitarios, suponiendo un periodo de amortización de 3 años.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PRECIO	PERIODO DE AMORTIZACIÓN	COSTE €/mes
MA1	Ordenador	699 €	36 meses	19.42
MA2	Láser (632.8 nm)	1157.41 €	36 meses	32.15
MA3	Lentes	36.88 €	36 meses	1
MA4	Montura lentes	66.32 €	36 meses	1.84
MA5	Espejos	160.78 €	36 meses	4.46
MA6	Polarizadores	996.62 €	36 meses	27.68
MA7	Motores rotatorios	2213.28 €	36 meses	61.48
MA8	Objetivos de microscópio	340.20 €	36 meses	9.45
MA9	Plataformas multiejes	6159.6 €	36 meses	171.1
MA10	Abrazaderas ópticas	791.70 €	36 meses	21.99
MA11	Abrazadera rotatoria	179.25 €	36 meses	4.98
MA12	Monturas para objetivos	91.36 €	36 meses	2.55
MA13	Medidor de potencia	3523 €	36 meses	97.86
MA14	Fotodetector	639 €	36 meses	17.25
MA15	Polarímetro	7088.77 €	36 meses	196.91
MA16	Sensor externo para polarímetro	3019.77 €	36 meses	83.88
MA17	Mesa óptica	5530.90 €	36 meses	153.63
MA18	Piezas mecanizadas	1220 €	36 meses	33.9
MA19	Aplicación de computación	1345 €	36 meses	37.36

Tabla E.4: Precio unitario del material amortizable.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CU/mes	MESES	COSTE €/mes
MA1	Ordenador	19.42	10	194.2
MA2	Láser (632.8 nm)	32.15 €	10	321.5
MA3	Lentes	1 €	10	10
MA4	Montura lentes	1.84 €	10	18.4
MA5	Espejos	4.46	10	44.6
MA6	Polarizadores	27.68	10	276.8
MA7	Motores rotatorios	61.48	10	614.8
MA8	Objetivos de microscópio	9.45	10	94.5
MA9	Plataformas multiejes	171.1	10	1711
MA10	Abrazaderas ópticas	21.99	10	219.9
MA11	Abrazadera rotatoria	4.98	10	49.8
MA12	Monturas para objetivos	2.55	10	25.5
MA13	Medidor de potencia	97.86	10	978.6
MA14	Fotodetector	17.25	10	172.5
MA15	Polarímetro	196.91 €	10	1969.1
MA16	Sensor externo para polarímetro	83.88	10	838.8
MA17	Mesa óptica	153.63	10	1536.3
MA18	Piezas mecanizadas	33.9	10	339
MA19	Aplicación de computación	37.36 €	10	373.6
MF1	Material de oficina	12	10	120

Tabla E.5: Coste de los recursos materiales.

En la Tabla E.5 se presentan los costes derivados de los recursos materiales.

Coste de recursos materiales: nueve mil ochocientos ochenta y ocho con nueve euros (9.888.9 €).

E.4. Resumen Final del Coste del Proyecto

En la Tabla E.6, se muestran los presupuestos parciales (recursos humanos y materiales) unidos en un total.

CONCEPTO	COSTE (€)
Recursos Humanos	6745
Recursos Materiales	9888.9
BASE IMPONIBLE	16633.9
Impuestos (IVA 21 %)	3493.12
TOTAL	20127.10

Tabla E.6: Resumen final del coste del proyecto

Por lo tanto, el coste total de la realización del proyecto **ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA POLARIZACIÓN EN FOP MICROESTRUCTURADAS PARA SU APLICACIÓN EN SENSADO ÓPICO**, asciende a veinte mil ciento veintisiete con 10 euros (20127.10 €).