

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias en Óptica
con orientación en Optoelectrónica**

**Análisis de los cambios en la birrefringencia de una fibra
fotónica de núcleo hueco, al introducir en su núcleo líquidos
anisotrópicos**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

José Alejandro Montenegro Orenday

Ensenada, Baja California, México

2020

Tesis defendida por
José Alejandro Montenegro Orenday

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Diana Tentori Santa Cruz
Director de tesis

Dra. Amelia Olivas Sarabia

Dr. Víctor Ruiz Cortés

Dr. Santiago Camacho López



Dr. Israel Rocha Mendoza
Coordinador del Posgrado en Óptica

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

José Alejandro Montenegro Orenday © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **José Alejandro Montenegro Orenday** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Óptica.

Análisis de los cambios en la birrefringencia de una fibra fotónica de núcleo hueco, al introducir en su núcleo líquidos anisotrópicos

Resumen aprobado por:

Dra. Diana Tentori Santa Cruz
Director de tesis

La invención de la fibra de cristal fotónico de núcleo hueco ha ampliado el campo de investigación en el área de sensores de fibra óptica, principalmente por su aplicación al biosensado. El revestimiento microestructurado de la fibra y el mismo núcleo hueco, permiten infiltrar muestras líquidas para su análisis y estudio. Uno de los parámetros relevantes para el sensado puede estar asociado ya sea a la fase o al estado de polarización de la señal usada. En esos casos es importante caracterizar tanto la birrefringencia residual de la fibra como los cambios inducidos en ella por estos líquidos. En el presente trabajo de tesis se planteó la construcción de un sistema de llenado para infiltrar las fibras huecas con líquidos, compatible con un arreglo de análisis de polarización que usa una fuente sintonizable de luz láser. La precisión de medida del arreglo polarimétrico depende de la correcta alineación de la muestra de fibra óptica. Se seleccionó el método denominado *butt-coupling*, usando una punta de entrada de fibra SMF-28e. El sistema de llenado construido tiene paredes transparentes que facilitan el proceso de alineación. La caracterización de la birrefringencia de la fibra fotónica de núcleo hueco se realizó analizando los cambios del estado de polarización de salida de una señal de entrada linealmente polarizada. Se realizaron barridos azimutales del estado de polarización de entrada (0 a 180 grados), que se repitieron cambiando la longitud de onda de entrada en un rango de trabajo de 1540 a 1560 nm (barrido espectral). Una vez concluido el trabajo experimental con la fibra de núcleo hueco, se realizó la infiltración del líquido por capilaridad. Se experimentó con 3 tramos de fibra de longitudes diferentes; al primero de 11.7 cm de largo se le introdujo Kahlúa (+), a un segundo tramo de 10.2 cm de longitud se le infiltró (R+) Limoneno y el tercero, de 10.2 cm de largo se infiltró con (R-,S-) Linalilo. Aunque los resultados obtenidos muestran cambios en la birrefringencia compatibles con la naturaleza quiral de los líquidos (dextrógira o levógira), en los dos últimos casos los valores experimentales mostraron una alta inestabilidad debida probablemente a la sensibilidad de las muestras a las condiciones ambientales. Las perturbaciones físicas dominantes que alteraron la birrefringencia de cada líquido se debieron a cambios en la temperatura, humedad y vibraciones. Cabe señalar que estos disturbios son despreciables al caracterizar fibras ópticas convencionales usando este arreglo polarimétrico.

Palabras clave: Fibras fotónicas de núcleo hueco, birrefringencia residual, birrefringencia inducida por un núcleo quiral.

Abstract of the thesis presented by **José Alejandro Montenegro Orenday** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Optics.

Analysis of the changes in birefringence of a hollow core photonic fiber, by introducing anisotropic liquids into its core

Abstract approved by:

Dra. Diana Tentori Santa Cruz
Thesis Director

The invention of the hollow-core photonic crystal fiber has broadened the field of research in the area of optical fiber sensors, mainly because of its application to bio sensing. The microstructured coating of the optical fiber and the same hollow-core, allow infiltrating liquid samples for the analysis and study of different physical properties. One of the parameters relevant to the sensing may be associated with either the phase or the polarization state of the signal used. In these cases, the characterization of the fiber residual birefringence and the changes induced in it by these liquids are essential. In the present thesis work, we propose the construction of a filling system to infiltrate the hollow fibers with liquids, compatible with a polarization analysis arrangement using a tunable source of laser light. The measurement accuracy of the polarimetric setup depends on the correct alignment of the fiber optic sample. To optimize alignment we selected the method called “butt-coupling”, using an SMF-28e fiber input tip. The built filling system has transparent walls that facilitate the alignment process. The analysis of the changes in the output polarization state of a linearly polarized input signal allowed the birefringence characterization of the hollow-core photonic fiber. We realized azimuthal sweeps of the input polarization state (0 to 180 degrees), for each input wavelength in a working range of 1540 to 1560 nm (wavelength scanning). After completing the experimental work with the hollow-core fiber, we proceeded to infiltrate the liquid using capillarity. We worked with three fiber sections of different lengths; the first 11.7 cm long was infiltrated with Kahlua (+), a second 10.2 cm long section was infiltrated with (R +) Limonene, and for the third (10.2 cm long) we used (R-, S-) Linalyl. Although the results obtained show changes in birefringence compatible with the chiral nature of the liquids (dextrorotatory or levorotatory), for the last two liquids, the experimental values showed high instability, probably due to the sensitivity of the samples to the environmental conditions. Temperature, humidity, and vibrations were the dominant physical disturbances that altered sample birefringence, stable when characterizing conventional optical fibers.

Keywords: Photonic fibers of the hollow-core, residual birefringence, chiral core induced birefringence.

Dedicatoria

A mis PAPAS, mi HERMANO
Y
mi SOBRINITA.

A Fer
Y
A mi abuelita Nena

A mi NOVIA

A toda mi FAMILIA

Las palabras sobran para expresar lo agradecido que estoy con todos y cada uno de ustedes.

Agradecimientos

Quiero agradecer a toda mi familia en especial a mis padres, a mi hermano y a mi novia por apoyarme en esta etapa, que resulto una gran aventura. Sin ustedes estaría perdido.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada sin la cual hubiese sido imposible culminar esta etapa de mi desarrollo académico.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por aceptarme en el programa de posgrado en Óptica y permitirme alcanzar el grado de Maestro en Ciencias.

A todo el personal tanto administrativo como docente del departamento de Física Aplicada, me llevo un recuerdo de cada uno.

A todos mis compañeros de la maestría en óptica, fuimos como una familia y me llevo los mejores recuerdos y los más gratos momentos de mi estancia en Ensenada. La amistad perdurará a pesar de la distancia; el Amiguito, Emilio, el Pariente, JOE, Yisus, Azael, el Negro, Edgardo, el estúpido Lambo, Angela, a Naye (entendieron a nade) POE.

Por otra parte quisiera agradecer al Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala que en la licenciatura me apoyó como ningún otro profesor y me invitó al laboratorio, de no ser por eso no hubiera aplicado para un posgrado.

Por ultimo quiero agradecer a la Dra. Diana Tentori Santa Cruz por creer en mi trabajo y aceptarme como su estudiante, me llevaré un recuerdo muy grato de usted.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xiii
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específico.....	2
1.4 Organización de la tesis.....	3
Capítulo 2. Caracterización polarimétrica de la birrefringencia de una fibra óptica monomodo	
2.1. Birrefringencia de retardadores homogéneos.....	4
2.1.1 Vectores de Stokes.....	5
2.1.2 Matrices de Mueller.....	7
2.1.3 Evolución del estado de polarización debido a la birrefringencia.....	7
2.1.4 Esfera de Poincaré.....	9
2.2. Identificación del tipo de retardo homogéneo.....	9
2.2.1 Retardador Lineal.....	10
2.2.2 Retardador Circular.....	10
2.2.3 Retardador Elíptico.....	11
2.3. Evaluación de la longitud de batimiento usando el método de barrido espectral.....	12
2.4. Eigenmodos de polarización y ángulo de retardo módulo π	14
2.4.1 Evaluación monocromática de la birrefringencia en una fibra monomodo.....	14
2.4.2 Ángulo azimutal y ángulo de elipticidad.....	15

Capítulo 3. Fabricación de la muestra de fibra fotónica de núcleo líquido

3.1. Planteamiento del problema.....	17
3.1.1 Propuesta inicial para la fabricación de la fibra de núcleo líquido.....	17
3.1.2 Especificaciones técnicas de la fibra estándar SMF-28e.....	18
3.1.3 Especificaciones técnicas de la fibra fotónica de núcleo hueco HC- 1550.....	19
3.1.4 Conectorización de la fibra fotónica.....	20
3.2. Alternativas consideradas para el diseño.....	20
3.2.1 Férula de circonia (acoplamiento fibra a fibra). Sistema de llenado 2.....	21
3.2.2 Diseño de sistema con lentes esféricas.....	21
3.2.2.1 Fabricación del sistema 2.....	22
3.2.3 Diseño de Estructura Transparente. Sistema 3.....	24
3.3. Diseño de la fibra fotónica de núcleo líquido.....	27
3.4. Pruebas de funcionamiento.....	27
3.5. Comparación con opciones de llenado alternativas.....	28
3.5.1 Llenado por presión con jeringa.....	29
3.5.2 Llenado con bomba de infiltración.....	29
3.5.3 Llenado por succión.....	30
3.6. Etapa Final de la Preparación de la Muestra	31

Capítulo 4. Birrefringencia de la fibra fotónica de núcleo líquido. Resultados experimentales

4.1. Arreglo usado para evaluar la birrefringencia de las muestras.....	34
4.1.1 Alineación del arreglo experimental	36
4.1.2 Introducción de la muestra en el arreglo.....	37
4.1.3 Marco de referencia.....	39
4.2. Primer Fibra.....	42
4.2.1 Barrido azimutal del estado de polarización a varias longitudes de onda.....	42
4.2.2 Diodo láser como fuente de luz.....	46
4.2.3 Líquido quiral Kahlúa.....	48
4.3. Segunda muestra de fibra.....	51
4.3.1 Barrido azimutal para diferentes longitudes de onda.....	52
4.3.2 Diodo láser DFB como fuente de luz.....	53
4.3.3 Líquido quiral (R+) Limoneno.....	54

4.4. Tercer fibra.....	57
4.4.1 Barrido azimutal a diferentes longitudes de onda.....	57
4.4.2 Diodo láser DFB como fuente de luz.....	58
4.4.3 Líquido quiral (R-,S-) Linalilo.....	59
Capítulo 5. Conclusiones	
5.1 Discusión.....	62
5.2 Conclusiones.....	64
Literatura citada.....	66
Anexo 1.....	68
Anexo 2.....	69

Lista de figuras

Figura	Página
1 Ejes de referencia y sentido de los ángulos 2ϕ y 2ω en la esfera de Poincaré.....	9
2 Trayectorias de la evolución del estado de polarización en un retardador lineal.....	10
3 Trayectorias de la evolución del estado de polarización en un retardador circular.....	11
4 Trayectorias de la evolución del estado de polarización en un retardador elíptico.....	12
5 Evolución de dos estados de polarización sobre la esfera de Poincaré.....	15
6 Evolución del SOP de salida obtenido barriendo el ángulo azimutal del SOP de entrada entre 0 y 360°	16
7 Propuesta inicial para el llenado del núcleo de la fibra fotónica.....	18
8 Fibra estándar. a) Perfil de la estructura de una fibra estándar. b) Distribucion del campo de intensidad en la cara de la salida de la fibra.....	18
9 Fibra fotónica de núcleo hueco. a) Perfil de la estructura. b) Perfil del campo de intensidad.	19
10 Fibra óptica con conectores.....	20
11 Férula de circonia.....	21
12 Estructura interna de la férula.....	21
13 Diseño del sistema de llenado 2.....	22
14 a) Pieza con cavidad para lente esférica y muesca de llenado de líquido, b) Pieza con cavidad para lente esférica de salida, c) y d) Piezas de soporte del sistema.....	22
15 Piezas impresas del sistema de llenado 2. a) piezas impresas, b) fibra con conector y hembra del conector, c) y d) piezas de entrada y salida respectivamente con jeringas, e) sistema de llenado en montura de traslación.....	23
16 Soportes impresos con material de impresión PLA blanco. a) Pieza con pared elástica para que no escape el líquido de la cavidad y pueda ser alineada la fibra. b) Perfil de la pieza antes mencionada donde se puede ver la fibra conectada.....	24
17 a) Tapón de férula recortado a 0.9 cm. b) Tapón recortado colocado en la férula del conector.....	24
18 Diseño final (Sistema 3). En este caso se usó un material transparente entre las dos fibras para facilitar su alineación.....	25

19	Sistema de llenado. a) Manguera transparente utilizada en sondas médicas. b) Conector de fibra óptica. c) Tapón plástico. d) Manipulación del tapón. e) Unión a presión de tramo de manguera y tramo del tapón. f) Aguja con estructura plástica ensamblada en un costado de la manguera transparente. g) Sistema de llenado con conectores de fibra óptica.....	26
20	Fibra hueca con luz del microscopio. a) Tramo mayor de 7 cm. sin líquido en su interior y sin cambios en la tonalidad de la estructura. b) Tramo de 2 cm con Kahlúa en su interior y con tonalidad café en su estructura.....	28
21	Infiltración en una fibra hueca con jeringa [Luis Mario <i>et al.</i> , 2017].....	29
22	Bomba de infusión de jeringas.....	29
23	Bomba de vacío casera.....	30
24	Microbomba de vacío.....	31
25	a) Vista lateral de la pieza diseñada con las medidas de los conectores, es la mitad del diámetro del conector. b) Vista frontal de la pieza para fijar el conector de la fibra óptica, se puede observar que las muescas a lo largo de la pieza son la figura del contorno del conector.....	31
26	a) Piezas impresas en 3D donde se encuentran 8 piezas que fijaran el movimiento de los conectores y 4 placas diseñadas especialmente para las monturas de traslación X Y Z. b) La piezas ya ensambladas, faltando las partes superiores que son agregadas cuando se encuentra el conector con la fibra de por medio.....	32
27	Piezas impresas en 3D con las monturas de traslación, estas piezas son ajustables gracias a un riel para monturas y sujeto a una placa de aluminio perforada. Todo esto a su vez está en un riel fijado a la mesa óptica.....	32
28	Esquema de la muestra lista para ser añadida en el arreglo de análisis de polarización.....	33
29	a) Arreglo para el análisis de polarización. b) Giro del polarizador.....	35
30	Evidencia del arreglo experimental desalineado.....	36
31	Alineación usando un láser HeNe.....	38
32	Alineación de la muestra de ambas monturas con haz láser de 632 nm (rojo).....	38
33	Arreglo simplificado para facilitar la alineación de la muestra.....	39
34	Arreglo experimental con la muestra.....	39

35	Generación del marco de referencia. a) Ajuste del controlador de polarización para obtener una polarización circular. b) Captura de pantalla de un hemisferio de la esfera. c) Polarización lineal con los 3 puntos de referencia. d) Polarización circular, cuando se retira el prisma de polarización.....	41
36	Captura de pantalla de Excel donde se observa el barrido grado por grado y los datos obtenidos.....	41
37	SOP de salida medido al variar la orientación del eje del polarizador para longitudes de onda para las que se usó un marco de referencia generado para 1550 nm. Esfera orientada con: a) la vista frontal de la traza naranja. b) la vista lateral de la traza naranja (1550 nm).....	44
38	SOP de salida medido al variar la orientación del eje del polarizador para longitudes de onda entre 1540 y 1557 nm. Esferas orientadas con: a) la vista frontal de la traza amarilla. b) la vista lateral de la traza amarilla (1540 nm).....	44
39	Resultados de barrido espectral iniciando de 1540 nm a 1550 nm. a) Vista frontal de 1548 nm. b) Vista lateral de 1548 nm. c) Vista frontal de 1545 nm, se observa una similitud con la traza de 1546 nm. d) Perfil de 1545 nm, donde se puede apreciar como línea recta al igual que 1540 nm y 1546 nm, las trazas de 1545 nm y 1546 nm a simple vista son paralelas entre sí.....	45
40	Resultados de barrido espectral construidos con datos para los que las condiciones ambientales fueron similares (1542, 1544, 1546, 1557, 1560 nm).....	46
41	Arreglo experimental con diodo láser como fuente.....	47
42	Medición rápida de 0° a 180° grados, con nueva alineación.....	47
43	Barrido azimutal (0 a 180 grados) del estado de polarización lineal de entrada.....	47
44	Esquema de la muestra y acercamiento al sistema de llenado.....	48
45	Llenado de fibra de núcleo hueco por capilaridad. a) Jeringa con manguera directo al sistema de llenado. b) Fotografía lateral del sistema de llenado, se observa las dos férulas y el líquido entre ellas.....	49
46	Resultados del SOP de salida obtenidos usando el arreglo de la Figura 41 para la fibra de núcleo líquido infiltrada con licor de café. A pesar de que el ángulo azimutal del SOP de entrada se mantuvo fijo, se obtuvieron trazas que muestran una evolución caótica del estado de polarización.....	49
47	Traza de la evolución del estado de polarización de salida medido al variar el ángulo azimutal del SOP de entrada. La discontinuidad de la traza indica que la birrefringencia de la muestra no se mantuvo constante durante el proceso de medición.....	50

48	Captura de pantalla de la esfera de Poincaré después de realizar el barrido azimutal del eje del polarizador. En este caso el ángulo azimutal del SOP lineal de entrada se mantuvo fijo. La traza indica que la birrefringencia de la muestra varió continuamente durante el proceso de captura de datos.....	50
49	Captura de pantalla en el instante en que dejó de girar el polarizador.....	51
50	Muestra con la segunda fibra fotónica.....	52
51	Resultados de barrido azimutal. Las circunferencias asociadas a las diferentes longitudes de onda no presentan un eje de simetría común, como se esperaría para una muestra con un retardo homogéneo (posición fija del eigenmodo). La mayoría está situada en una misma región de la esfera, estando muy cerca una circunferencia de la de otra, por lo que esto puede deberse a un cambio constante en la temperatura.....	52
52	Resultado rápido de rotar el polarizador desde su posición inicial 0° hasta 180°	53
53	Resultado con circunferencia mal formada sin continuidad en la traza.....	54
54	Traza del estado de polarización de salida obtenida para un periodo de tiempo de 5 minutos, manteniendo fijo el ángulo azimutal del SOP lineal de entrada. Debido a la inestabilidad ambiental se trabajó sin generar un marco de referencia.....	55
55	Corrida rápida de 0° a 180° obtenida habiendo generado el marco de referencia. Puede observarse un giro en la posición de la traza debido al cambio en la definición de la orientación de los ejes de la esfera de Poincaré.....	55
56	Impresiones de pantalla. a) Primer minuto de tener la lámpara cerca de la muestra. b) Captura a los 3 minutos. c) Impresión de pantalla a los 5 minutos de exponer el calor de la lámpara a la muestra.....	56
57	Resultados de barrido azimutal del SOP lineal de entrada para la tercera fibra. Se pueden observar circunferencias bien definidas con cambios en su orientación mucho más pronunciados. No se alcanza a percibir una tendencia dominante.....	57
58	Para evaluar la birrefringencia de la tercer muestra de fibra, sin líquido infiltrado se realizó una prueba rápida (1549 nm), variando el ángulo azimutal del SOP lineal de entrada de 0° a 180° . La traza obtenida fue circular.....	58
59	Evaluación del estado de polarización de salida usando un barrido azimutal del SOP lineal de la señal de entrada de 1549 nm. En este caso las inestabilidades ambientales produjeron discontinuidades observables al final de la traza.....	58
60	Medición continua durante 5 minutos.....	59
61	Resultado del estado de polarización caótico en respuesta a una perturbación física externa.....	60
62	En este resultado se observa cómo sistema empieza a estabilizarse.....	61

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Vectores de Stokes de salida.....	8

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

La observación y comprensión de fenómenos naturales ha sido la piedra angular del desarrollo tecnológico del hombre y esto no es la excepción en la rama de la física que estudia el comportamiento, características y manifestaciones de la radiación electromagnética; la óptica.

Fenómenos tan comunes como la reflexión de la luz, dieron origen a la fabricación de medios para el guiado ésta. Tal es el caso de la fibra óptica, una estructura de cilindros concéntricos de vidrios con diferentes propiedades ópticas (índice de refracción), la cual confina un haz de luz a lo largo de la estructura central (núcleo) gracias al fenómeno denominado reflexión interna total.

Este tipo de medio ha revolucionado los sistemas de comunicaciones a nivel global, es de interés en muchos campos científicos y dentro de sus aplicaciones se encuentra el diseño de un gran número de sensores y láseres de fibra óptica.

Debido al gran aporte de las fibras ópticas Philip Russell desarrolla en 1996 el primer prototipo de una fibra de cristal fotónico [Knight J. C. *et al.*, 1996]. Este nuevo tipo de fibras no puede ser explicado por el fenómeno conocido como reflexión interna total, ya que la microestructura de su cubierta es la que genera un gap de banda fotónica que confina la luz, permitiendo que la propagación ocurra sólo a lo largo del núcleo. Las fibras de cristal fotónico son motivo de un gran interés científico y han generado una nueva rama de experimentación.

1.2 Justificación

Se han presentado a la comunidad científica un gran número de trabajos basados en las fibras de cristal fotónico, relevantes debido a que este tipo de fibras presentan menor presencia de fenómenos no lineales y nuevas oportunidades de aplicación debido a su estructura.

La cubierta microestructurada de este tipo de fibras permite el llenado, en el interior de dicha estructura, de líquidos o gases.

Cuando se propaga luz a lo largo de la fibra y ésta interactúa con la sustancia con que se infiltró, la luz propagada muestra amplias variaciones en frecuencia que pueden llegar a ser detectadas con instrumentos científicos, dando pie a la realización de biosensores [Bueno García *et al.*, 1999] o como en el trabajo de Collantes Pablo *et al.*, 2016. Los mecanismos de sensado pueden basarse en la modulación de características como la polarización, la longitud de onda, la intensidad y la fase [Stephan Smolka *et al.*, 2007].

Para aplicar correctamente estas fibras es necesario, investigar el efecto de las variaciones asociadas a cambios en la frecuencia (longitud de onda) o en el estado de polarización de la luz dentro de las fibras de cristal fotónico [F.M. Cox *et al.*, 2006]. Caracterizar experimentalmente la polarización de la luz [Estrada Barrios *et al.*, 2014].

Una cualidad importante de estas fibras, es que es posible llenar selectivamente la microestructura, lo que permite generar otras condiciones físicas de trabajo. Al respecto, existen publicaciones experimentales que aprovechan esta alternativa, y reportan algunas técnicas para aplicar la selección de agujeros [Yanyi Huang *et al.*, 2004].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar experimentalmente los cambios inducidos en la birrefringencia de una fibra de cristal fotónico cuyo núcleo, originalmente hueco, es infiltrado por un líquido (HCL-PCF), y verificar si los modelos de las matrices de birrefringencia de retardadores homogéneos permiten describir los resultados experimentales encontrados.

Objetivo específico

Construcción de un sistema de llenado para una fibra de cristal fotónico de núcleo hueco (HC-PCF, hollow-core photonic crystal fiber).

Añadir este sistema en un arreglo polarimétrico con una fuente de luz sintonizable y observar los cambios inducidos al variar el contenido del núcleo de la fibra fotónica HC-PCF.

Los diferentes líquidos con los cuales se realizan los experimentos serán los siguientes: dos líquidos quirales dextro-rotatorios: (R+) Limoneno y un licor mexicano de café (~20% alcohol; +); así como un líquido quiral levo-rotatorio: (R-,S-) Linalilo.

El limoneno y el linalilo son líquidos que se utilizan comúnmente en experimentos científicos y el licor de café se utiliza a partir de experimentos previos realizados en el grupo de trabajo; los cuales dieron resultados interesantes con este líquido en particular.

1.4 Organización del documento de Tesis

Los temas tratados en el presente trabajo de tesis, están organizados por capítulos. En el primer capítulo se presentan el objetivo y la justificación de introducir líquidos quirales a fibras de cristal fotónico de núcleo hueco. El siguiente capítulo se enfoca en la parte teórica que respalda este trabajo, partiendo de la birrefringencia residual en fibras monomodo y cómo modelarla por medio de retardadores homogéneos, a partir de su caracterización polarimétrica.

La fabricación de las herramientas necesarias para realizar el trabajo experimental que se reporta en este documento se describe en el Capítulo 3. En dicho capítulo se presentan tanto las técnicas que se emplearon, como los diseños que se abordaron y fabricaron; los errores y los aciertos. A continuación, en el Capítulo 4 se describe el arreglo experimental que se utilizó y los resultados obtenidos una vez que se combinó con las herramientas fabricadas. Los datos experimentales reportados se refieren a tres tramos de fibras ópticas, para las cuales se caracterizó la birrefringencia por medio de un método denominado de barrido espectral. Posteriormente se presenta la infiltración de tres líquidos quirales (mencionados en el objetivo específico) uno para cada tramo de fibra y los cambios inducidos en la birrefringencia de las fibras.

En el Capítulo 5 se presenta la discusión de resultados, seguida de las conclusiones del trabajo realizado.

Capítulo 2. Caracterización polarimétrica de la birrefringencia de una fibra óptica monomodo

En este capítulo se describen los conceptos teóricos utilizados en el desarrollo de este trabajo de tesis. En particular se aborda el tema referente a la birrefringencia residual en fibras ópticas monomodo. En el caso de las fibras monomodo convencionales, esta característica óptica se debe a que la estructura geométrica del núcleo y la cubierta de la fibra no corresponden a cilindros concéntricos de sección transversal circular. Esta imperfección se genera durante el proceso de fabricación, y como consecuencia de esta asimetría geométrica, se considera que un tramo corto de fibra monomodo (menor de 100 m) tiene un eje menor (rápido) y uno mayor (lento).

Para evaluar la birrefringencia residual en una fibra óptica se usa un arreglo polarimétrico con el que se simula experimentalmente la evolución del estado de polarización (SOP, por sus siglas en inglés) de la luz a lo largo de la fibra usando la técnica de recorte o el método de barrido espectral. Los resultados se mapean sobre la esfera de Poincaré y utilizando la teoría de retardadores homogéneos y la representación matricial de Mueller es posible determinar si la fibra óptica se comporta como un retardador lineal, circular o elíptico. Si la birrefringencia de la fibra corresponde a la de un retardador homogéneo, es posible determinar sus eigenmodos de polarización usando el método propuesto por A. Rojas Sánchez. [Rojas Sánchez *et al.*, 2019].

2.1 Birrefringencia de retardadores homogéneos

Dado que el índice de refracción efectivo de una fibra está asociado a su diámetro, el tener una fibra con dos ejes de diámetros diferentes induce birrefringencia. La birrefringencia residual en las fibras induce un retardo (δ) entre los modos de polarización dado por:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L; \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz, L es la longitud de la fibra y Δn su birrefringencia. De la ecuación anterior puede verse que a partir de ella es posible determinar cuál es el cambio que ocurre en el estado de polarización (SOP, por sus siglas en inglés) cuando la señal se propaga, variando la longitud L de la fibra. A este método se le conoce como técnica de recorte. Tiene la desventaja de que es destructivo. Sin embargo, despreciando la variación que ocurre en la birrefringencia al cambiar la longitud de onda de la

señal, podemos determinar cómo evoluciona la señal variando su longitud de onda. A esta técnica no destructiva se le denomina *de barrido espectral*.

Para describir a los estados de polarización de la luz, en este trabajo se usan vectores de Stokes. Además, considerando que la absorción de la fibra es despreciable y en ausencia de campos externos que puedan modificar su birrefringencia, de acuerdo a la óptica de polarización, su birrefringencia debiera corresponder a la de un retardador homogéneo (para una fibra recta).

A continuación, se presentan los vectores de Stokes y las matrices de Mueller usadas para describir a los retardadores homogéneos (lineal, circular y elíptico).

2.1.1 Vectores de Stokes

Los vectores de Stokes están representados de la siguiente forma [Gutiérrez Jun Carlos *et al*, 2008]

$$\mathbf{S} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^t, \quad (2)$$

donde, los parámetros S_i , del vector de Stokes \mathbf{S} corresponden a las componentes del campo eléctrico E_{0x} y E_{0y} de la señal y al desfase de estas mismas componentes, representado por el ángulo ϕ .

La intensidad total (I) de la luz está representada por S_0 .

$$S_0 = I = 1, \quad (\text{intensidad total normalizada})$$

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2. \quad (3)$$

El parámetro S_1 representa una polarización lineal horizontal si $S_1 = 1$ y vertical si $S_1 = -1$,

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2. \quad (4)$$

La polarización lineal a $\pm 45^\circ$ está representada con el parámetro S_2 ,

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos\phi. \quad (5)$$

S_3 representa una polarización circular levógira o dextrógira,

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\text{sen } \phi. \quad (6)$$

La intensidad total al cuadrado es la suma de cada parámetro al cuadrado que describen los distintos estados de polarización,

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (7)$$

El vector de Stokes puede ser representado en forma de matriz columna, escrito de la siguiente forma:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Para un haz de luz elípticamente polarizado la representación matricial tiene la siguiente forma:

$$S = \begin{bmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y}\cos \phi \\ 2E_{0x}E_{0y}\text{sen } \phi \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Para los estados de polarización principales se tiene que la representación vectorial es:

Luz no polarizada

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Polarización lineal

$$\text{Horizontal} \quad S = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{Vertical} \quad S = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{Lineal a } +45^\circ \quad S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{Lineal a } -45^\circ \quad S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Polarización Circular

$$\text{Circular a la derecha } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15) \quad \text{Circular a la izquierda } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.1.2 Matrices de Mueller

Estos arreglos bidimensionales de elementos se usan para modelar la birrefringencia de un material, en este caso, de la fibra óptica. Suponiendo que corresponde a la de un retardador lineal o circular, con un ángulo azimutal cero y con un retardo lineal o circular δ :

$$M_{\text{lineal}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \text{sen } \delta \\ 0 & 0 & -\text{sen } \delta & \cos \delta \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$M_{\text{circular}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \text{sen } \delta & 0 \\ 0 & -\text{sen } \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

El caso del retardador homogéneo elíptico con ángulo azimutal cero, ángulo de elipticidad ω y retardo total δ , se representa con la matriz de Mueller siguiente:

$$M_{\text{elíptica}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2\text{sen}^2 2\omega \text{sen}^2 \frac{\delta}{2} & \text{sen } 2\omega \text{sen } \delta & \text{sen } 4\omega \text{sen}^2 \frac{\delta}{2} \\ 0 & -\text{sen } 2\omega \text{sen } \delta & \cos \delta & \cos 2\omega \text{sen } \delta \\ 0 & -\text{sen } 4\omega \text{sen}^2 \frac{\delta}{2} & -\cos 2\omega \text{sen } \delta & 1 - 2\cos^2 2\omega \text{sen}^2 \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

2.1.3 Evolución del estado de polarización debido a la birrefringencia

Considerando una fuente monocromática que emite luz linealmente polarizada (vector de Stokes de entrada) entrando en la fibra monomodo (representada por una matriz de Mueller), que se comporta como un medio anisótropo homogéneo libre de absorción, a su salida se obtiene un haz de luz con polarización

distinta a la de entrada (vector de Stokes de salida). El estado de polarización de salida se calcula usando la relación que se da a continuación,

$$\mathbf{S}_{Salida} = M\mathbf{S}_{Entrada}. \quad (20)$$

Si la señal de entrada linealmente polarizada tiene un ángulo azimutal φ con respecto al sistema del laboratorio,

$$\mathbf{S}_{Entrada} = (1 \quad \cos 2\varphi \quad \sin 2\varphi \quad 0)^{transpuesta}, \quad (21)$$

realizando la operación de la Ecuación (20) para la señal de entrada linealmente polarizada $\mathbf{S}_{Entrada}$ y la matriz de un medio birrefringente M , se obtienen los vectores de Stokes de salida para cada tipo de retardador. Estos vectores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Vectores de Stokes de salida

Retardador lineal	$\mathbf{S}_{Salida} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\varphi \\ \cos \delta \sin 2\varphi \\ -\sin \delta \sin 2\varphi \end{bmatrix}, \quad (22)$ <p>ángulo azimutal φ y ángulo de retardo δ.</p>
Retardador circular	$\mathbf{S}_{Salida} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos (2\varphi \pm \delta) \\ \sin (2\varphi \pm \delta) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (23)$ <p>ángulo de retardo total δ y \pm izquierda a derecha respectivamente.</p>
Retardador elíptico	$\mathbf{S}_{Salida} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\varphi(1 - 2\sin^2 2\omega \sin^2 2\delta) + \sin 2\varphi \sin 2\omega \sin 2\delta \\ -\cos 2\varphi \sin 2\omega \sin 2\delta + \sin 2\varphi \cos 2\delta \\ \cos 2\varphi \sin 4\omega \sin^2 \delta - \sin 2\varphi \cos 2\omega \sin 2\delta \end{bmatrix}, \quad (24)$ <p>ángulo de elipticidad ω.</p>

2.1.4 Esfera de Poincaré

La esfera de Poincaré (Figura 1) se utiliza para generar una descripción gráfica de los estados de polarización. Cada uno de ellos se representa como un punto en esta esfera (de radio unitario), usando como coordenadas a los ángulos esféricos 2φ y 2ω , o el sistema cartesiano asociado a los parámetros de Stokes (S_1 , S_2 , S_3). Cada punto en la esfera de longitud 2φ y latitud 2ω corresponde a un estado de polarización, cuya elipse tiene un ángulo azimutal φ y una elipticidad ω [Gil Pérez J.J. *et al.*, 1991].

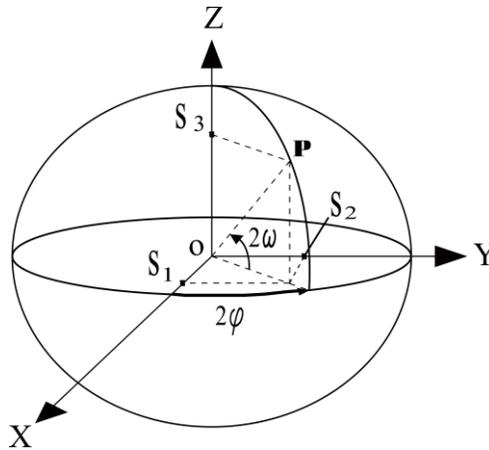


Figura 1. Ejes de referencia y sentido de los ángulos 2φ y 2ω en la esfera de Poincaré.

Cabe señalar que al trabajar con la esfera de Poincaré, el campo eléctrico representado usando los vectores de Stokes permite describir luz polarizada total ($S_0 = 1$) o parcialmente ($S_0 < 1$).

2.2 Identificación del tipo de retardo homogéneo

Cuando la luz viaja a través de la fibra óptica la birrefringencia residual genera un cambio en el estado de polarización de la luz que se propagó por la fibra, lo que dependiendo de su birrefringencia da lugar a un vector de Stokes de salida como los mostrados en la Tabla 1. Modificando linealmente el valor del ángulo de retardo [Ecuación (1) para $\delta(L)$], es posible simular la evolución del estado de polarización a lo largo de cada tipo de retardador y mapear el resultado sobre la esfera de Poincaré [Treviño *et al.*, 2005].

2.2.1 Retardador Lineal

Para determinar la birrefringencia lineal después de haber realizado el barrido espectral, se hace un análisis gráfico con ayuda de la esfera de Poincaré. En la Figura 2 se pueden apreciar las trayectorias circulares descritas por la evolución del estado de polarización, compartiendo cada una un mismo eje de simetría que cruza por el centro de cada circunferencia. En este caso se puede trazar un eje de simetría que interseca a la esfera, cruzando por el ecuador. Este eje de simetría indica que para un retardador lineal los eigenmodos de polarización del retardador son estados de polarización lineales.

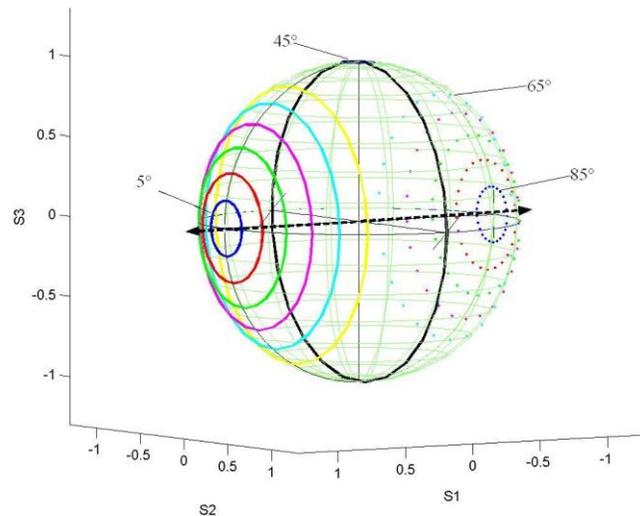


Figura 2. Trayectorias de la evolución del estado de polarización en un retardador lineal [tomado de Treviño *et al.*, 2005].

2.2.2 Retardador Circular

Para un estado de polarización lineal de entrada, una trayectoria circular sobre el ecuador de la esfera de Poincaré revela que la birrefringencia corresponde a la de un retardador circular.

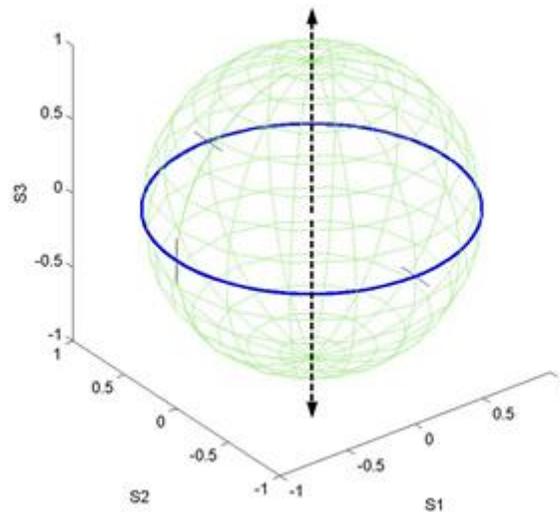


Figura 3. Trayectorias de la evolución del estado de polarización en un retardador circular [tomado de Treviño *et al.*, 2005].

Esta evolución del estado de polarización se da al variar el valor del ángulo de retardo δ . En este caso, el eje de simetría cruza a través de los polos norte y sur de la esfera, lo que indica que los eigenmodos de polarización son circulares.

2.2.3 Retardador Elíptico

De la Tabla 1, utilizando el vector de Stokes de salida para un retardador elíptico, y variando el valor del ángulo de retardo δ , los parámetros $S1$, $S2$ y $S3$ describen trazas como las mostradas en la Figura 4. De nuevo, cada traza corresponde a un SOP lineal de entrada con diferente ángulo azimutal. En este caso, puede demostrarse [Treviño *et al.*, 2005] que las trazas que se generaron tienen también un eje de simetría común, que interseca a la esfera de Poincaré en dos puntos que no coinciden con el ecuador, ni con sus polos. Corresponden a estados de polarización elípticos. Por tanto los eigenmodos de polarización de un retardador elíptico, son elípticos.

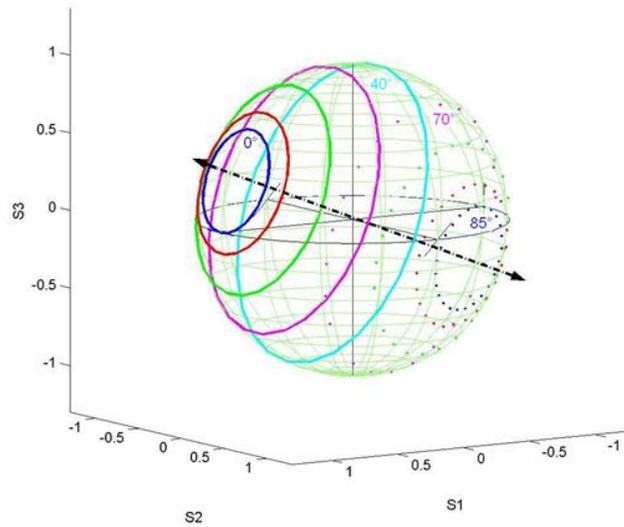


Figura 4. Trayectorias de la evolución del estado de polarización en un retardador elíptico [tomado de Treviño *et al.*, 2005].

2.3 Evaluación de la longitud de batimiento usando el método de barrido espectral

En la práctica las fibras presentan perturbaciones internas, como elipticidad del núcleo y esfuerzos internos que producen diferencias características sobre las constantes de propagación de los modos ortogonales de polarización [Treviño *et al.*, 2005].

Un parámetro frecuentemente usado para caracterizar la birrefringencia de las fibras ópticas es la longitud de batimiento, que corresponde a la longitud de fibra para la que el retardo de fase es igual a 2π . Esto significa, por una parte, que para tramos de fibra de diferentes longitudes, cuyo retardo de fase se evalúe usando luz con una misma longitud de onda, es necesario tener dos longitudes distintas de fibra para que su diferencia de fase sea igual a 2π :

$$\delta_{L_1} - \delta_{L_2} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n (L_1 - L_2) = 2\pi. \quad (25)$$

Usando la definición de longitud de batimiento de la polarización en la relación anterior,

$$L_1 - L_2 = L_B = \frac{\lambda}{\Delta n}. \quad (26)$$

Por otra parte, para un mismo tramo de fibra, de longitud L , el retardo de fase para una longitud de onda λ_i es:

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} L \Delta n, \quad (27)$$

por lo que si los retardos de fase para las longitudes de onda λ_1 y λ_2 difieren en 2π , usando la relación obtenida para L_B :

$$\delta_1 - \delta_2 = 2\pi L \Delta n \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L_B, \quad (28)$$

de donde

$$L_B = L \lambda \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (29)$$

Si L es la longitud de la fibra y se supone que $\lambda = \lambda_2$:

$$L_B \approx L \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right). \quad (30)$$

Cuando el retardo de fase medido para dos longitudes de onda es igual a $2\pi/q$ [Treviño *et al.*, 2005]:

$$L_B \approx qL \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right). \quad (31)$$

Aunque variando la longitud de la fibra se puede obtener la información necesaria para conocer la longitud de batimiento de la polarización de la fibra, es más práctico realizar un barrido espectral. En este caso se cambia la longitud de onda de la señal de entrada y como se ha discutido, con los datos obtenidos para longitudes de onda distintas, es posible medir el ángulo de retardo sobre la esfera de Poincaré y calcular L_B .

2.4 Eigenmodos de polarización y ángulo de retardo módulo π

Los eigenmodos de polarización son dos estados de polarización mutuamente ortogonales que permiten caracterizar la birrefringencia de un retardador homogéneo. Al propagarse, dichos estados de polarización no varían conforme la luz se propaga a lo largo de la fibra.

2.4.1 Evaluación monocromática de la birrefringencia en una fibra monomodo

Para conocer la birrefringencia de una fibra y poder predecir la evolución del estado de polarización a lo largo de ésta, es necesario determinar la ubicación de sus eigenmodos de polarización (ángulo azimutal y ángulo de elipticidad) y conocer el valor del ángulo de retardo. En la sección anterior resultó evidente que la exactitud de la metodología propuesta por Treviño *et al.*, en 2005 se ve limitada por el uso de la técnica de barrido espectral. Aunque este método permite determinar si la fibra se comporta o no como un retardador homogéneo, su precisión debe mejorarse y para ello es necesario medir la birrefringencia usando señales monocromáticas.

Para determinar la ubicación de los eigenmodos de polarización se propuso (Chartier *et al.*, 2001) realizar esta evaluación usando una señal monocromática, identificando primeramente el ángulo azimutal de la birrefringencia de la fibra. Para ello, como se verá más adelante, se usan las propiedades geométricas de la evolución del SOP de un estado de polarización lineal de entrada. A continuación, utilizando señales de entrada elípticamente polarizadas cuyo ángulo azimutal coincida con el medido para la birrefringencia de la fibra, estos autores propusieron variar el valor del ángulo de elipticidad de la señal de entrada hasta que los SOP de entrada y salida coincidieran.

En 2007, Tentori *et al.*, plantearon una simplificación a esta evaluación que sólo hace uso de estados de polarización lineales de entrada (fáciles de generar) y de las relaciones teóricas que describen la óptica de polarización de los retardadores homogéneos. Se determina el ángulo azimutal de la birrefringencia y a continuación, después de redefinir el marco de referencia del sistema polarimétrico de forma que su eje horizontal coincida con la orientación del ángulo azimutal de la birrefringencia de la fibra, se mide el SOP de salida para un SOP lineal de ángulo azimutal cero. En este caso el uso de la descripción matricial permite también determinar el valor del ángulo de retardo módulo- π .

En 2019, Rojas-Sánchez *et al.*, propusieron una metodología más simple, la cual se describe en la siguiente sección.

2.4.2 Ángulo azimutal y ángulo de elipticidad

Experimentalmente se generan estados de polarización lineales con ayuda de un prisma polarizador de calcita, esto con la finalidad de definir el ángulo azimutal φ de la señal polarizada linealmente. Se varía el ángulo azimutal del estado de polarización de 0 a 180° (o a 360°). Debido a que la esfera de Poincaré es una esfera-doble, la evolución del SOP de la señal de salida genera un círculo mayor sobre la esfera de Poincaré. Existe un valor del ángulo azimutal de la señal de entrada para el que el SOP de salida es también lineal. Mapeando la evolución del SOP a lo largo de la fibra sobre la esfera de Poincaré esto correspondería a una traza como la de la curva roja en la Figura 5.

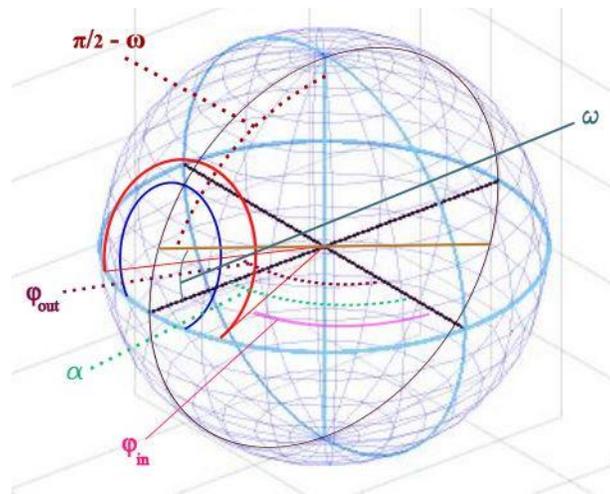


Figura 5. Evolución de dos estados de polarización sobre la esfera de Poincaré.

El ángulo azimutal del SOP lineal de entrada que corresponde al estado de polarización lineal de salida es φ_{in} . El ángulo azimutal del SOP lineal de salida es φ_{out} . Estos estados tienen una posición simétrica con respecto al eigenmodo de polarización, por lo que el ángulo azimutal de dicho eigenmodo está dado por:

$$\alpha = \varphi_{in} + \frac{(\varphi_{out} - \varphi_{in})}{2}. \quad (32)$$

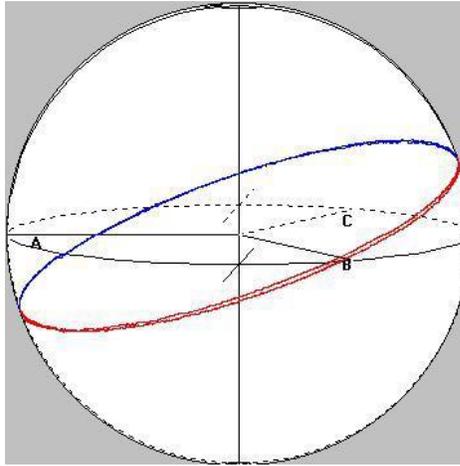


Figura 6. Evolución del SOP de salida obtenido barriendo el ángulo azimutal del SOP de entrada entre 0 y 360°.

Usando el valor medido para el SOP de salida (S_{out}) que corresponde al ángulo azimutal α , es posible calcular el valor del ángulo de elipticidad:

$$\tan(2\omega) = \frac{1 - S1_{out} \cos(2\alpha) - S2_{out} \sin(2\alpha)}{S3_{out}}, \quad (33)$$

donde

$$S_{out} = [S1_{out} \quad S2_{out} \quad S3_{out}]^t. \quad (34)$$

Para calcular el ángulo de retardo δ módulo $-\pi$ se utiliza:

$$\tan\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{\tan[2(\theta - \alpha)]}{\sin(2\omega)}, \quad (35)$$

donde α es el ángulo azimutal del primer SOP lineal de entrada para el que el SOP de salida es lineal. A partir de este valor de “ δ módulo $-\pi$ ” y del valor aproximado de la longitud de batimiento calculado usando los datos de barrido espectral, es posible determinar el valor real de ángulo de retardo, considerando la longitud de la muestra utilizada.

Capítulo 3. Fabricación de la muestra de fibra fotónica de núcleo líquido

En el presente capítulo se describe detalladamente el trabajo experimental de este proyecto de tesis y las actividades que se realizaron para satisfacer los objetivos de éste.

Este capítulo abarca la idea general del sistema de llenado de una fibra fotónica de núcleo hueco en el que se ha infiltrado un líquido (HCL-PCF) y de lo que se pretende lograr fabricando este sistema, así como los detalles del diseño y fabricación. Se ilustra el esquema del diseño que se eligió para la fabricación y la preparación de la fibra óptica de cristal fotónico, así como la estructura de soporte para los experimentos deseados. De aquí en adelante este conjunto será denominado “muestra”.

Una vez que se tiene la muestra, ésta se instala en el arreglo experimental de análisis de polarización.

3.1 Planteamiento del problema

Para caracterizar la birrefringencia de la fibra óptica utilizando el método de barrido espectral, se realiza el experimento pertinente sin alterar la posición de la fibra. Esto es debido a que se requiere evaluar la birrefringencia residual de la fibra y determinar los cambios inducidos cuando se infiltra con un líquido con actividad óptica, sin introducir cambios adicionales.

Existen diversas técnicas de llenado de fibras fotónicas de núcleo hueco, pero en general estas técnicas requieren manipular la fibra óptica. En este trabajo se necesita un método para infiltrar el líquido deseado a la fibra alterando lo menos posible la posición de ésta.

3.1.1 Propuesta inicial para la fabricación de la fibra fotónica de núcleo líquido

Con la condición de no alterar la posición de la fibra fotónica de núcleo hueco y a su vez introducir algún tipo de fluido, se plantea: 1) colocar una fibra estándar frente a la fibra de núcleo hueco en una estructura que les dé soporte para evitar movimientos no deseados y 2) que tenga un orificio que permita la inserción de líquido.

La fibra estándar actúa como fuente de luz, ya que la luz que se propague por su núcleo se acopla a la fibra fotónica. Con una jeringa se introduce líquido a la estructura de soporte. La fibra estándar que se propone es la SMF-28e (ver anexo) y la fibra fotónica de núcleo hueco es HC-1550-02 (ver anexo).

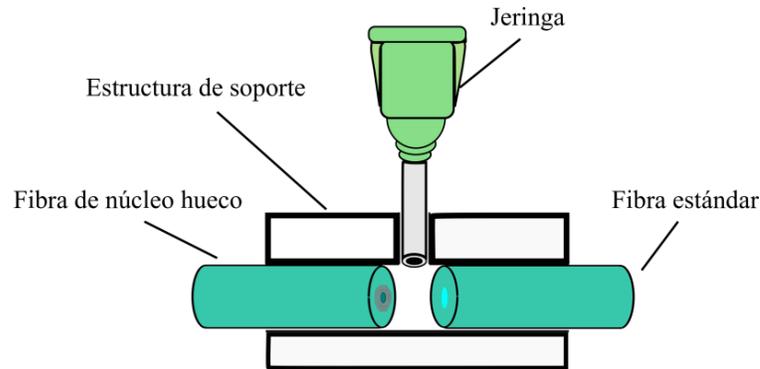


Figura 7. Propuesta inicial para el llenado del núcleo de la fibra fotónica.

3.1.2 Especificaciones técnicas de la fibra estándar SMF-28e

La fibra estándar o fibra convencional es una estructura compuesta de dos cilindros concéntricos de materiales flexibles generalmente fabricados a partir de un tipo de vidrio llamado sílice (SiO_2) [D. Mynbaev *et al.*, 2001] con índices de refracción distintos; la estructura cilíndrica central es denominada “núcleo” y posee un índice de refracción mayor que el de la estructura cilíndrica externa nombrada “cubierta”. En la Figura 8 a) puede apreciarse el perfil de la estructura de la fibra estándar; en 8 b) se muestra la distribución de intensidad típica asociada al haz en la cara de salida. La propagación de la luz se da por reflexión interna total a lo largo de las fibras ópticas, esto es posible por la diferencia de índices de refracción. Esta diferencia se logra dopando ligeramente el núcleo, ya que tanto el núcleo como la cubierta están fabricados del mismo material (vidrio de sílice).

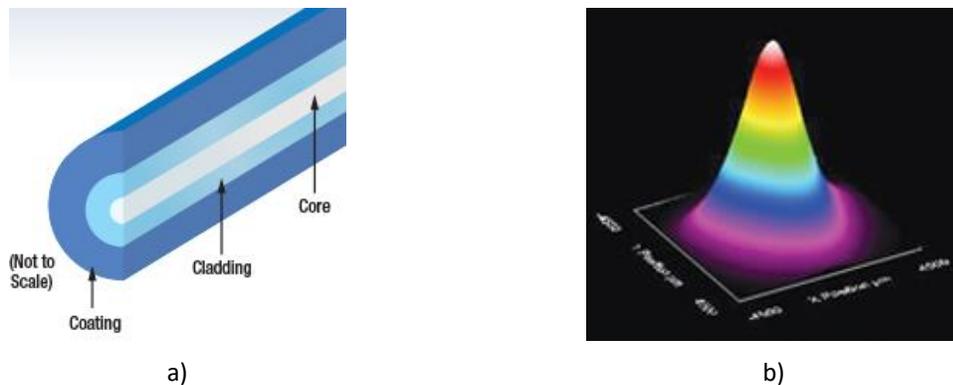


Figura 8. Fibra estándar. a) Perfil de la estructura de una fibra estándar. b) Distribución del campo de intensidad en la cara de salida de la fibra.

3.1.3 Especificaciones técnicas de la fibra fotónica de núcleo hueco HC-1550

La fibra HC-1550 es una fibra de núcleo hueco, el cual está rodeado por una cubierta microestructurada de agujeros de aire y sílice; este tipo de fibra es conocido como fibra de cristal fotónico.

Para entender su funcionamiento, es necesario entender la idea de cristal fotónico. Ésta es una estructura caracterizada por la variación periódica del índice de refracción y la distribución espacial de la constante dieléctrica. Tales estructuras definen rangos de frecuencia y direcciones en las cuales la propagación de la onda electromagnética es prohibida o está permitida. Los cristales fotónicos presentan un índice de refracción periódico en una, dos o tres dimensiones [Esther González *et al.*, 2013].

Debido a la naturaleza de la distribución geométrica de estas estructuras, se genera una banda prohibida; i.e., un gap de banda fotónica. La luz se propaga sólo por el núcleo debido al confinamiento introducido por esta estructura. Dado que sólo una pequeña fracción de la luz se propaga en la sílice, los efectos no lineales son insignificantes y las fibras no sufren las mismas limitaciones de pérdida que las fibras convencionales hechas de materiales sólidos.

La fibra que se utiliza en el presente trabajo de tesis tiene un rango operacional de longitud de onda que abarca desde 1490 hasta 1680 nm, el diámetro de la cubierta es de $120 \pm 2 \mu\text{m}$, el diámetro del núcleo es de $10 \pm 1 \mu\text{m}$ y el diámetro de los huecos del revestimiento es de $3.8 \pm 0.1 \mu\text{m}$.

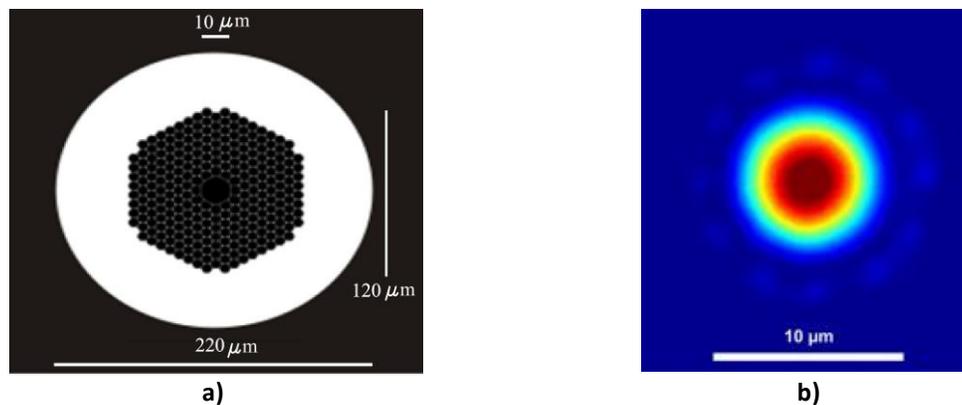


Figura 9. Fibra fotónica de núcleo hueco. a) Perfil de la estructura. b) Perfil del campo de intensidad.

3.1.4 Conectorización de la fibra fotónica

Con la propuesta del problema se planteó la necesidad de diseñar y construir un soporte adecuado para el manejo de la fibra, ya que el trabajo que se llevaría a cabo requiere de ajustes finos. Una solución a este problema consistió en implementar conectores para fibra óptica en las puntas.

El primer reto fue quitar el recubrimiento de plástico que protege a la fibra. A falta de pinzas especiales para el grosor de este tipo de fibras, se utilizó una navaja de afeitar. Con la fibra sin el recubrimiento plástico se realizó un corte a la punta con ayuda de la cortadora de fibra. La fibra se introdujo con mucho cuidado para no fracturar su punta; inicialmente por la parte inferior del conector hasta llegar al orificio de la férula de 126 μm de diámetro.

Se colocó la fibra de forma tal que sobresaliera de la férula de circonia del conector y se añadió epoxy Loctite 680 alrededor de la fibra óptica, sin contaminar la punta. La punta de la fibra se acercó lo más posible a la férula de circonia, en contacto con el epoxy. Este adhesivo seca en alrededor de 2 minutos, pero se permitió un secado de 15 minutos.



Figura 10 Fibra óptica con conectores.

Estos mismos pasos se repiten en el otro extremo de la fibra, colocando antes las protecciones de plástico que brindan un soporte extra, útil para la manipulación de este dispositivo óptico (estructuras plásticas translúcidas en la Figura 10).

3.2 Alternativas consideradas para el diseño

El diseño que se utilizó para el trabajo experimental fue el resultado de la evolución de alternativas que se diseñaron e inclusive se fabricaron a lo largo del trabajo de tesis y que por una u otra razón no se pudieron concretar. Sin embargo, al final se obtuvo un diseño simple, eficaz y fácil de utilizar.

3.2.1 Férula de circonia (acoplamiento fibra a fibra). Sistema de llenado 2

Para la fabricación del sistema de llenado se tuvo como idea principal utilizar una férula de circonia de 10.5 mm de largo, con un diámetro de 2.5 mm; estas férulas son utilizadas en comunicaciones por fibra óptica. La fotografía de las férulas se muestra en la Figura 12. La idea inicial consistía en introducir fibra óptica convencional en un extremo de la férula y en el otro extremo, la fibra de cristal fotónico de núcleo hueco, acercar ambas fibras entre sí tanto como fuera posible y el líquido sería introducido por una perforación realizada en la cara lateral de la férula. Este diseño no se desarrolló debido a que ambas fibras tienen diámetros diferentes, acercarlas y alinearlas no resultó factible.



Figura 11. Férula de circonia.

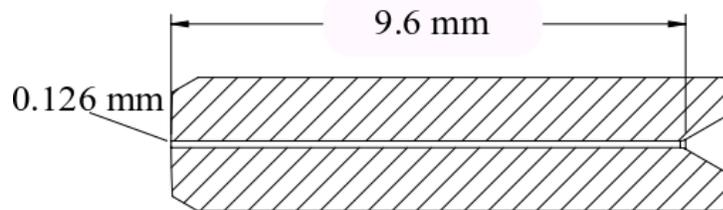


Figura 12. Estructura interna de la férula.

3.2.2 Diseño de sistema con lentes asféricas

Teniendo en cuenta los puntos que se mencionaron con anterioridad, se concluyó que el diseño del sistema debía tomar en cuenta la alineación entre la fibra de cristal fotónico y la fibra estándar, que fuera posible agregar o retirar una fibra óptica de cristal fotónico con gran facilidad, y que pudiera introducirse el líquido por un extremo (Entrada), llenando la fibra fotónica mediante la generación de un vacío en la cavidad formada en el extremo opuesto de la fibra (Salida). El diseño resultante se obtuvo con ayuda de las dimensiones de la férula y de lentes asféricas tipo C con las siguientes especificaciones: diámetro 4.7 mm,

distancia focal de 2.76 mm, apertura numérica 0.26, rango de trabajo espectral de 1050 – 1700 nm. Se agregaron conectores para fibra óptica y piezas hembra donde empotran estos conectores.

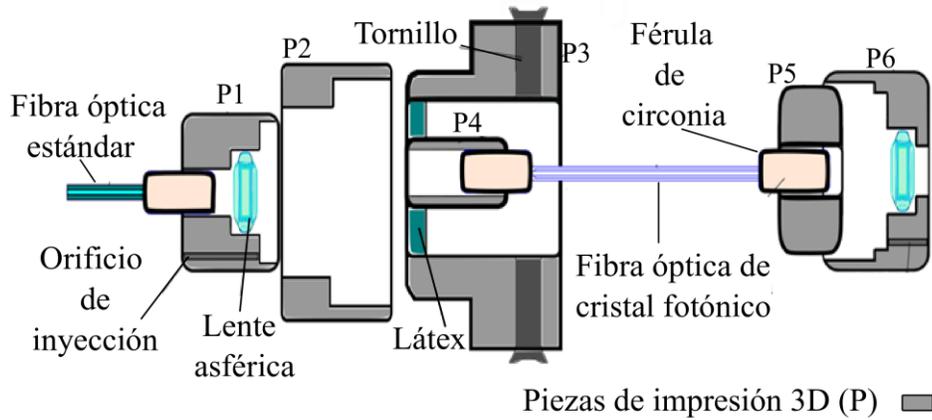


Figura 13. Diseño del sistema de llenado 2.

3.2.2.1 Fabricación del sistema 2

Se utilizó el programa de modelado en 3D SolidWorks para diseñar una conexión de Entrada y una de Salida. Se diseñó cada pieza que se muestra en los esquemas de la Figura 14.

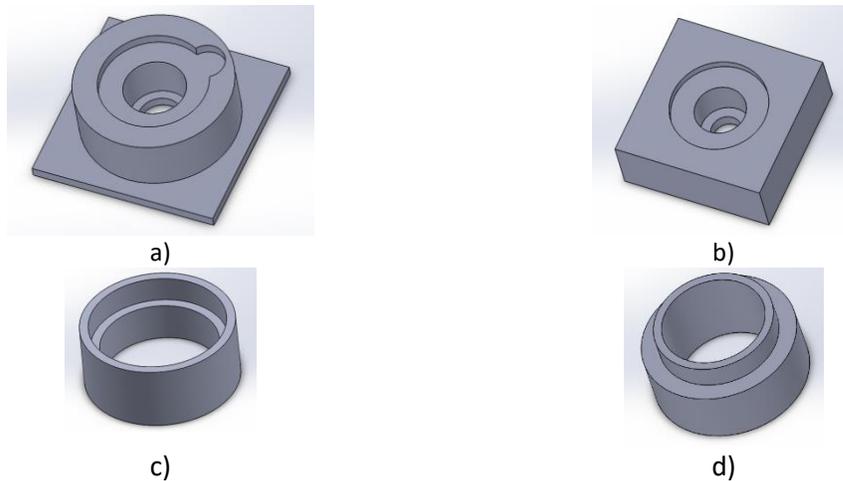


Figura 14. a) Pieza con cavidad para lente esférica y muesca de llenado de líquido, b) Pieza con cavidad para lente esférica de salida, c) y d) Piezas de soporte del sistema.

Estas piezas fueron fabricadas con ayuda de la impresora 3D *ultimaker*². Cabe mencionar que se realizaron innumerables pruebas con la finalidad de emparejar las medidas usadas en el proceso de diseño, con las obtenidas para las piezas ya impresas.

En la Figura 15 se muestran fotografías de las piezas impresas y cómo se añadieron las partes hembra para los conectores de fibra óptica; además de las agujas para jeringas incluidas para infiltrar el líquido que se fuera a utilizar en el experimento.

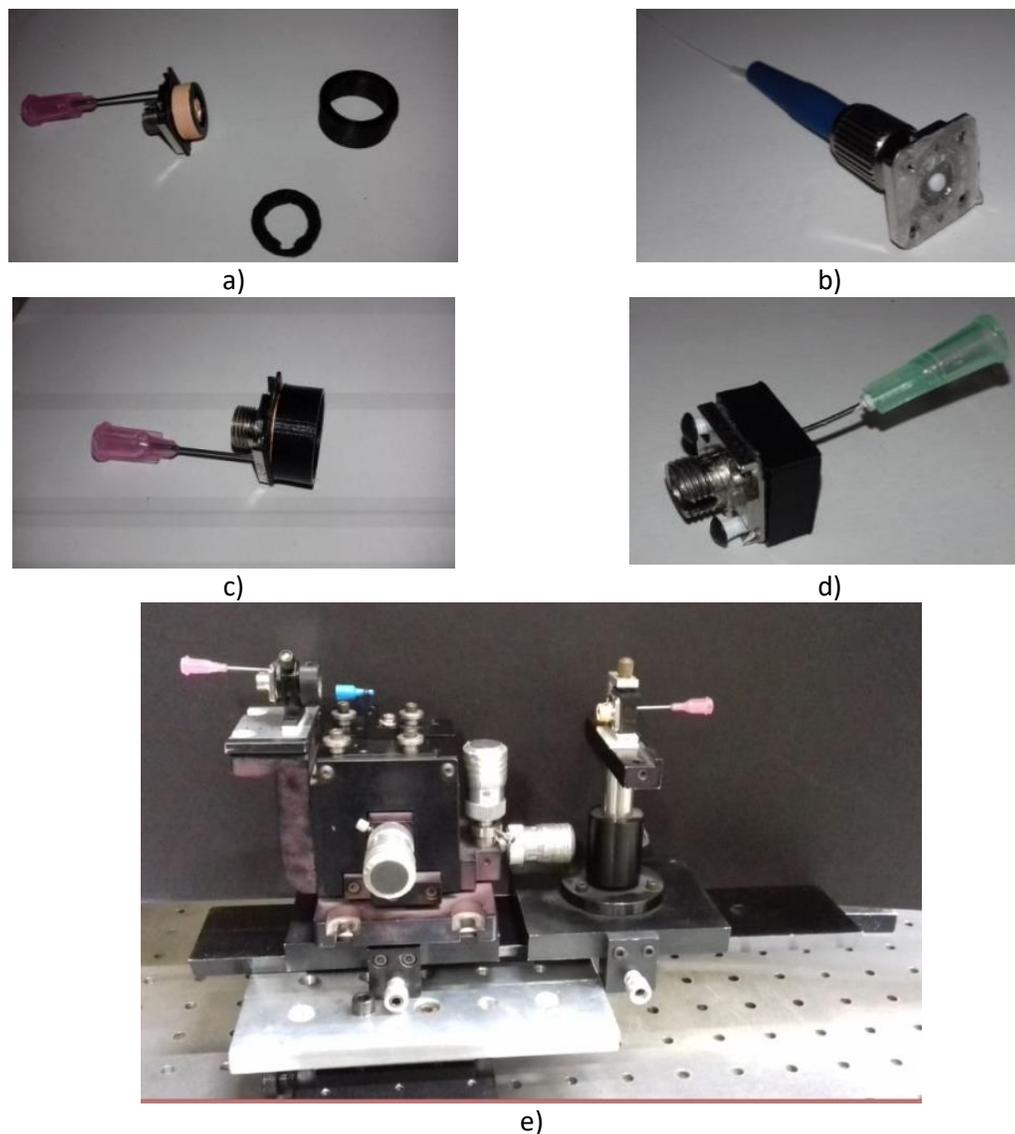
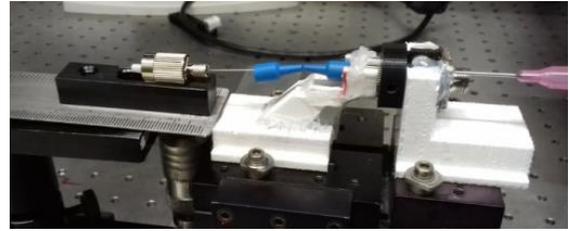


Figura 15. Piezas impresas del sistema de llenado 2. a) piezas impresas, b) fibra con conector y hembra del conector, c) y d) piezas de entrada y salida respectivamente con jeringas, e) sistema de llenado en montura de traslación.



a)



b)

Figura 16. Soportes impresos con material de impresión PLA blanco. a) Pieza con pared elástica para que no escape el líquido de la cavidad y pueda ser alineada la fibra. b) Perfil de la pieza antes mencionada donde se puede ver la fibra conectada.

Se consideró imprimir bases como soporte para las piezas de entrada, añadiéndoles una pared elástica (membrana de color morado en las Figura 16 a)) que permitiera alinear la fibra.

Este diseño se logró fabricar pero no se aplicó al sistema final debido a que no fue posible alinear la fibra de núcleo hueco. Esto se debió principalmente a lo opaco del material, que generó incertidumbre en el posicionamiento de la fibra fotónica.

3.2.3 Diseño de Estructura Transparente. Sistema 3

Teniendo en cuenta la dificultad para acoplar la luz en la fibra hueca [Danyun Fan *et al.*, 2017] y lo opaco de los diseños que se habían probado, se eligió utilizar un material transparente para localizar visualmente la fibra fotónica.

Este diseño partió de tener una fibra fotónica y una fibra estándar con conectores, las férulas de estos conectores son protegidas con unas estructuras cilíndricas traslúcidas que funcionan de tapón. Se retiró la pared superior de estos tapones (Figura 17 a)) dejando expuesta la férula de uno de los conectores con la finalidad de alinear la otra férula con la segunda fibra (Figura 17 b)).

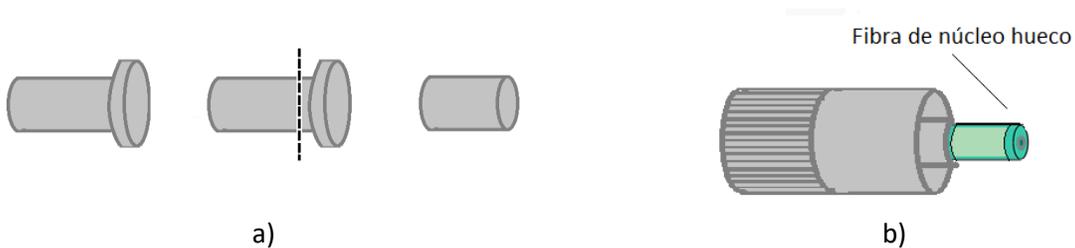


Figura 17. a) Tapón de férula recortado a 0.9 cm. b) Tapón recortado colocado en la férula del conector.

Se añadió un tramo de 1 cm de manguera transparente con un diámetro interno de 3.1 mm y un diámetro externo de 4.1 mm. Este tramo de manguera permite el confinamiento del líquido que es inyectado por un orificio lateral. Al usar un material transparente es posible identificar las posiciones de las puntas de la fibra estándar y la fibra hueca. Por el núcleo sólido de la fibra estándar se propaga la luz proveniente de una fuente de luz láser. Con ayuda de una montura de traslación en XYZ es posible alinear ambas fibras con la finalidad de acoplar a la fibra hueca, la luz proveniente de la fibra estándar.

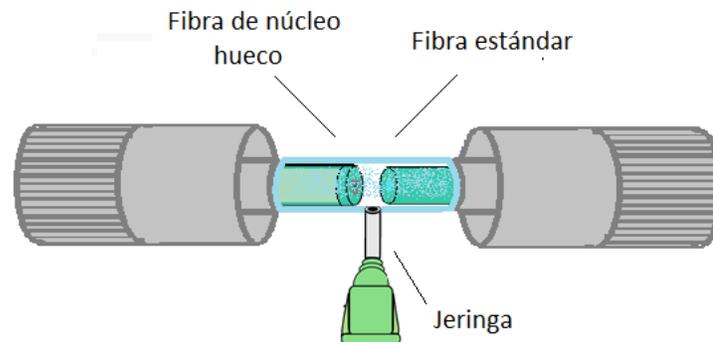


Figura 18. Diseño final (Sistema 3). En este caso se usó un material transparente entre las dos fibras para facilitar su alineación

En la Figura 19 se plasma material fotográfico de la fabricación de este diseño. Se puede observar lo simple de la fabricación, que además se realiza con material accesible, lo que facilita su reproducción para realizar más de una prueba experimental.

En el diseño se nota una aguja para jeringa (Figura 18). Este tipo de agujas tiene una estructura plástica que permite enroscarles una jeringa. Se ajustó la longitud de la aguja considerablemente, hasta tener únicamente 3 mm entre la base de la estructura plástica y la punta de la aguja, como se puede observar en la Figura 19.

Un factor importante a cuidar es impedir que el líquido se fugue por algún orificio. La solución consistió en usar en frío silicón transparente. Éste fue colocado en los extremos de la unión de la manguera y el tapón (Figura 19 e), donde terminan las férulas blancas de los conectores, y alrededor de la aguja que se introduce en la manguera transparente. Se cuidó que el silicón no contaminara las puntas de las férulas de las que salen las fibras tanto estándar como fotónica.

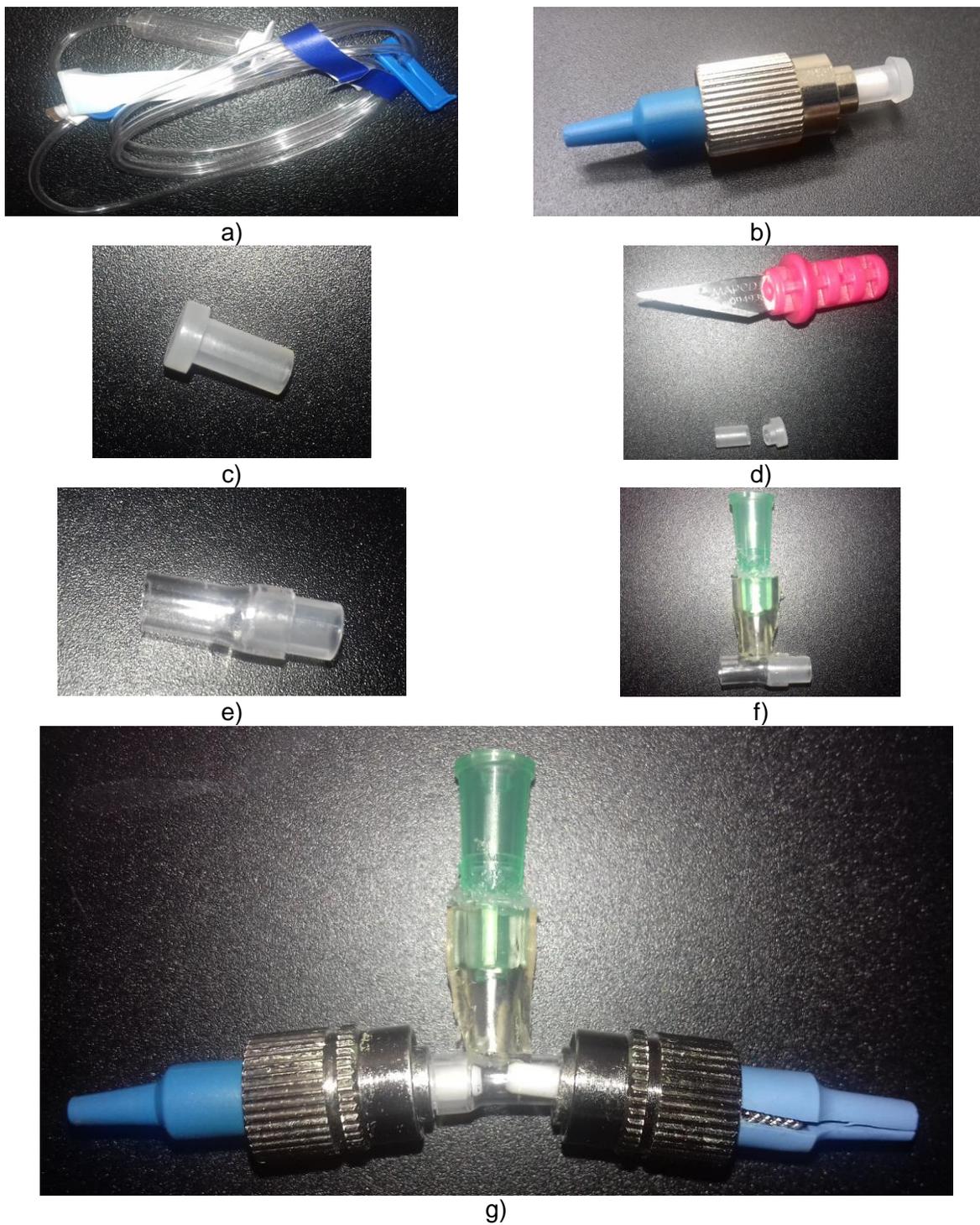


Figura 19. Sistema de llenado 3. a) Manguera transparente utilizada en sondas médicas. b) Conector de fibra óptica. c) Tapón plástico. d) Manipulación del tapón. e) Unión a presión de tramo de manguera y tramo del tapón. f) Aguja con estructura plástica ensamblada en un costado de la manguera transparente. g) Sistema de llenado con conectores de fibra óptica.

3.3 Diseño de la fibra fotónica de núcleo líquido

Una fibra microestructurada ofrece la opción de introducir líquidos en su núcleo, con la finalidad de variar los parámetros de operación, pasando de una cavidad pasiva a una estructura con actividad óptica generada por el líquido infiltrado.

Una vez que se tiene un sistema de llenado funcional (Sistema 3), se prosigue con la fabricación de una fibra de núcleo líquido. El líquido se infiltra en el núcleo de la fibra por capilaridad.¹ El líquido no se infiltra instantáneamente a lo largo de toda la fibra, esto puede tardar algunas horas, dependiendo de la viscosidad del líquido, el diámetro de los huecos y la longitud del tramo a llenar. Es importante que durante la infiltración no se altere la posición de la fibra.

3.4 Pruebas de funcionamiento

Debido a que el diseño del sistema de llenado se realizó con la idea de trabajar usando el fenómeno de capilaridad, se consideró necesario corroborar su funcionamiento.

Se realizó una prueba de llenado por capilaridad con un tramo de 7 cm de fibra fotónica de núcleo hueco. A esta fibra se le infiltró con licor de café Kahlúa (licor de café). Esta prueba se realizó con el tramo de fibra de 7 cm en posición vertical, la punta del extremo inferior de la fibra se sumergió en el licor de café; la longitud de la fibra que estuvo inmersa fue de alrededor de 0.5 cm. El tiempo que se dejó expuesta esta fibra al líquido fue de aproximadamente 24 horas (desde que inicia la infiltración del líquido hasta que se llena la fibra). Éste es el tiempo de descanso que se utiliza para generar el marco de referencia, necesario para el análisis de los cambios en el estado de polarización.

Una vez que el tiempo de espera finalizó, el paso siguiente fue observar en el microscopio el perfil del extremo que no estuvo inmerso en el líquido y observar si se tenía líquido en el núcleo. Los resultados de esta prueba fueron confusos. No se podía resolver si el líquido estaba o no en los orificios de la

¹ La capilaridad es un fenómeno de los fluidos, dependiente de la tensión superficial, que les permite a los líquidos ascender o descender en una estructura cilíndrica de diámetro comparable al del cabello humano (del orden de 0.1 mm) [Nielsen K. *et al.*, 2005].

microestructura. Sin embargo, esta prueba pasó a segundo término cuando se me percaté del cambio de tonalidad en la fibra, mostrado en la Figura 20 b).

Con anterioridad se había observado que el perfil de la fibra hueca era transparente, como se muestra en la Figura 20 a). Después de la infiltración se observó que la fibra presentaba una tonalidad café, similar a la del líquido Kahlúa.

Con el fin de verificar que la coloración se debía al líquido en el núcleo, se recortaron 2 cm del extremo que no estuvo sumergido en el líquido, ya que se pensó que probablemente la tonalidad se debía a lo que se infiltró en la cubierta cuando esa sección estuvo sumergida en el líquido. Al acoplar la luz del microscopio en el tramo de 2 cm se observó la tonalidad café del núcleo de la fibra, con lo que se concluyó que éste había sido infiltrado con el líquido café.

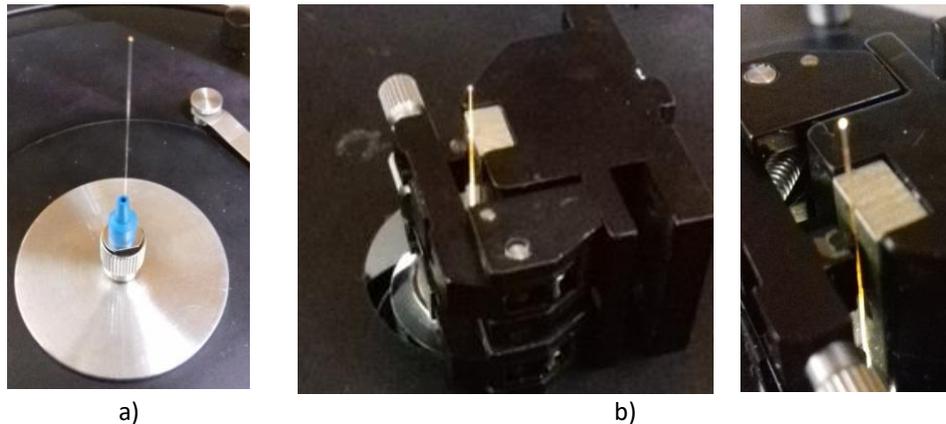


Figura 20. Fibra hueca con luz del microscopio. a) Tramo mayor de 7 cm. sin líquido en su interior y sin cambios en la tonalidad de la estructura. b) Tramo de 2 cm con Kahlúa en su interior y con tonalidad café en su estructura.

Con esta prueba se comprobó que el método de capilaridad es eficiente para la fabricación de una fibra de núcleo líquido y con ayuda del diseño de estructura transparente, el llenado de distintas fibras con diferentes líquidos permitirá realizar el trabajo experimental de este proyecto.

3.5 Comparación con opciones alternativas

En esta sección se mencionan algunos otros procedimientos utilizados para el infiltrado de líquidos en microcavidades, que fueron probados o considerados para este trabajo de tesis.

3.5.1 Llenado por presión con jeringa

Esta técnica puede usarse en una fibra hueca como la usada en este trabajo. Sin embargo, introduce desplazamientos, por lo que no es adecuada para el experimento de análisis polarimétrico que se plantea.

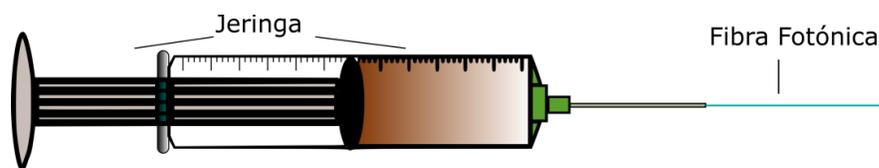


Figura 21. Infiltración en una fibra hueca con jeringa [tomado de Morales Villagómez *et al.*, 2017].

3.5.2 Llenado con bomba de infiltración

Otra alternativa es utilizar un método similar al de inyección con jeringa, pero con ayuda de máquinas de infiltración de jeringas (Figura 22). Estas máquinas son utilizadas en el llenado de microcanales y controlan el flujo de llenado, para evitar que colapsen las microestructuras.

Este método también altera la posición de la muestra durante el proceso de infiltración. Además, el sistema de llenado tiene que ser introducido en el arreglo polarimétrico. Introducir esta máquina o alguna otra al arreglo, presentaba un problema de distribución de espacio en un arreglo fijo que tiene diferentes usuarios.



Figura 22. Bomba de infiltración de jeringas.

3.5.3 Llenado por succión

Esta forma de llenado fue probada de distintas maneras, es lo opuesto al llenado por presión con jeringa ya que este método aprovecharía el diseño con lentes esféricas donde se tiene una sección de entrada y una de salida. La idea era introducir el líquido en la entrada, y en la salida realizar la succión. Se intentó realizar la succión con una jeringa normal, pero este tipo de jeringa no lo permitió.

Cabe señalar que para estas pruebas se utilizaron microtubos con un núcleo con dimensiones iguales a la fibra de núcleo hueco. Posteriormente se intentó implementar este método usando una bomba de vacío casera y las piezas que se fabricaron en 3D.



Figura 23. Bomba de vacío casera.

Con esta bomba de llenado se pretendía generar vacío en la cavidad de la pieza impresa y que el líquido del otro extremo pasara por el núcleo del capilar, generando el núcleo líquido. Esto no se consiguió.

Finalmente se sustituyó la bomba de vacío casera con una microbomba de vacío de fábrica. Esta prueba no funcionó y al observar el capilar en el microscopio, se pudo ver el núcleo del capilar colapsado.

Aunque estas pruebas no fueron satisfactorias, pudieran ser útiles para reducir el tiempo en el que se infiltra el líquido por capilaridad. El periodo de tiempo asignado al trabajo de tesis no permitió seguir experimentando con este método, por lo que se abandonó.

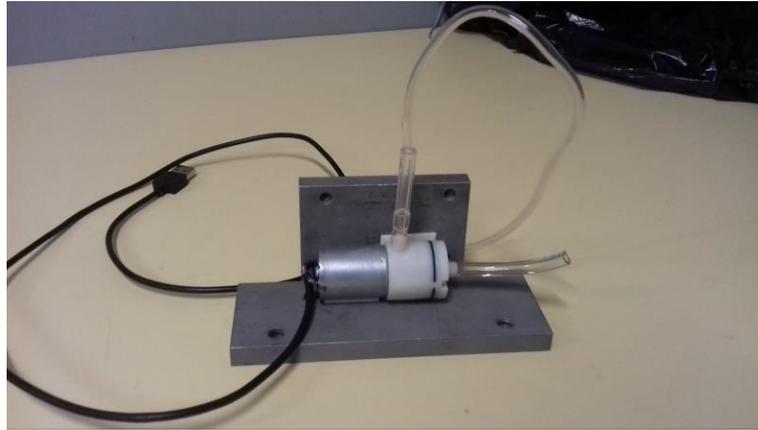
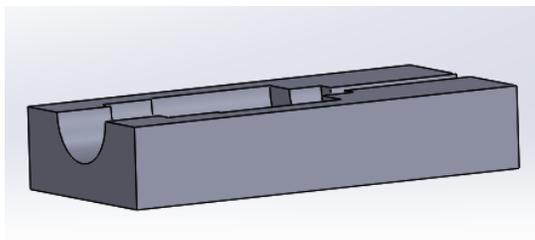


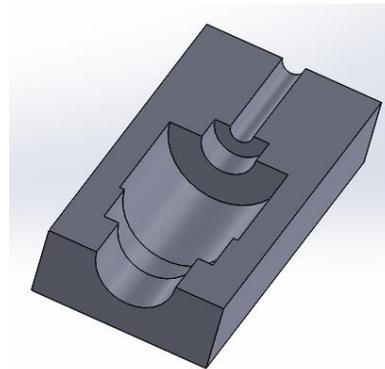
Figura 24. Microbomba de vacío.

3.6 Etapa Final de la Preparación de la Muestra

Con el sistema de llenado fabricado y después de corroborar el funcionamiento del fenómeno de capilaridad mediante las pruebas mencionadas con anterioridad, se construyeron soportes para fijar la fibra de cristal fotónico con los conectores en cada extremo. Se construyeron también soportes para las fibras SMF-28e que permitieran la manipulación requerida para acoplar luz al núcleo hueco de la fibra.



a)



b)

Figura 25. a) Vista lateral de la pieza diseñada con las medidas de los conectores, es la mitad del diámetro del conector. b) Vista frontal de la pieza para fijar el conector de la fibra óptica, se puede observar que las muescas a lo largo de la pieza son la figura del contorno del conector.

Se modeló en el programa de SolidWorks una pieza para contener en su interior los conectores de las fibras ópticas. Como se puede observar en la Figura 25, donde se utilizan dos piezas idénticas para contener los

conectores, el interior se encuentra seccionado siguiendo el contorno de los conectores. Estos se fijan sobre las paredes sólidas.

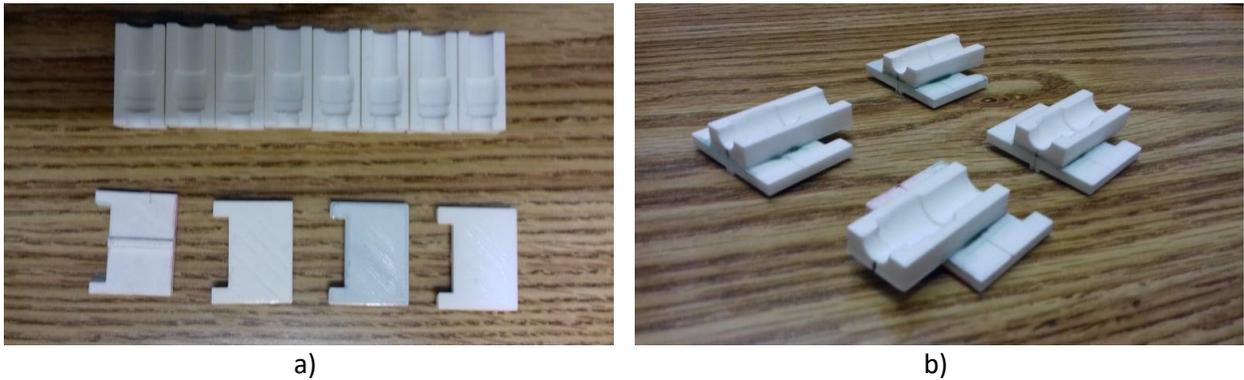


Figura 26. a) Piezas impresas en 3D donde se encuentran 8 piezas que fijan el movimiento de los conectores y 4 placas diseñadas especialmente para las monturas de traslación X Y Z. b) La piezas ya ensambladas, faltando las partes superiores que son agregadas cuando se encuentra el conector con la fibra de por medio.

La cara de una de estas piezas se adhiere a una placa especialmente diseñada y fabricada para que sea compatible con las monturas de traslación XYZ. Las cuatro piezas resultantes son ajustadas en dos monturas de traslación, presentadas de tal forma que las piezas fijas de las monturas están pegadas una frente a la otra (Figura 27).

Ambas monturas se sujetan a un riel para evitar que se desplacen, y a su vez para regular la distancia entre ellas. Esto es importante ya que en estas piezas fijas (de tonalidades rojizas que se puede observar en la Figura 27) es donde se asientan los extremos de la fibra de cristal fotónico de núcleo hueco.

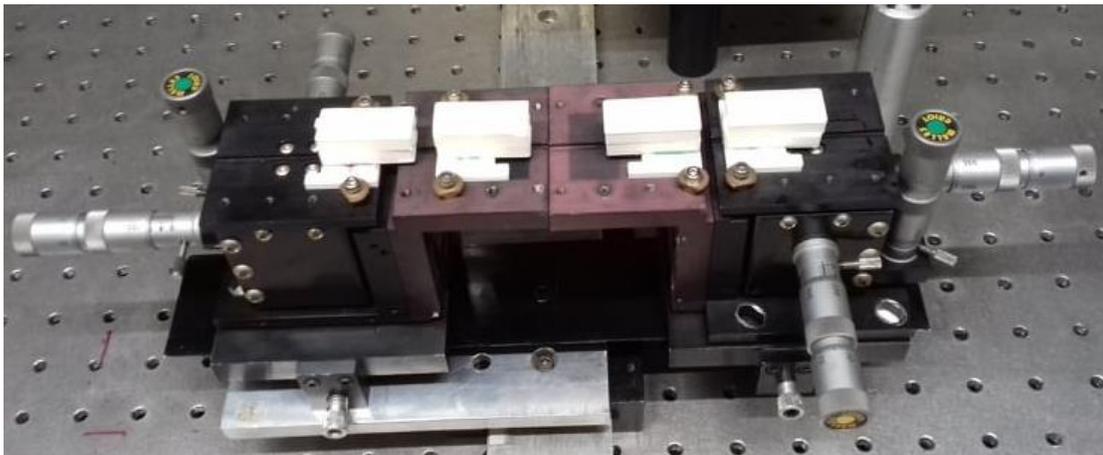


Figura 27. Piezas impresas en 3D con las monturas de traslación, estas piezas se ajustaron sobre un riel de aluminio, sujeto a una placa de aluminio perforada. Todo esto a su vez está en un riel que se fija a la mesa óptica.

En las secciones cuya posición se ajusta usando los tornillos micrométricos de las monturas de traslación, se fijan las puntas de las fibras SMF-28e para alinear las fibras. En la Figura 28 se ilustra un esquema del sistema final con la muestra ya lista para realizar las pruebas experimentales.

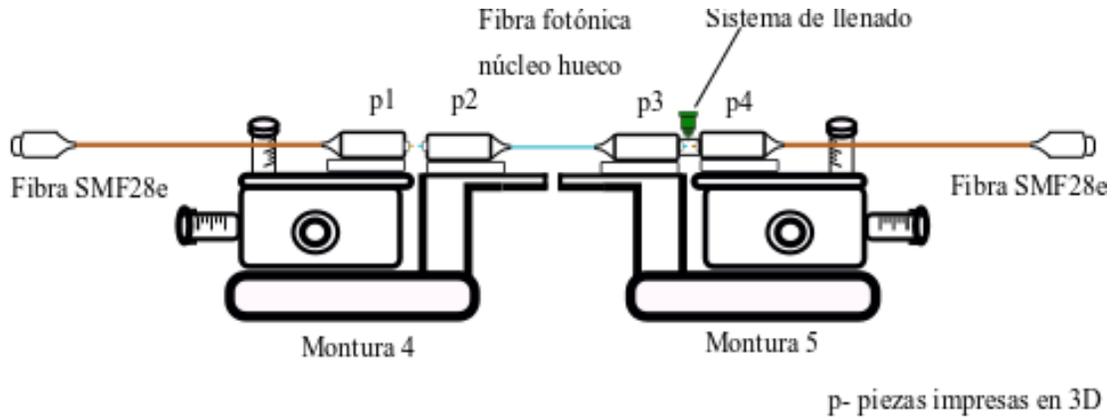


Figura 28. Esquema de la muestra lista para ser añadida en el arreglo polarimétrico.

Capítulo 4. Birrefringencia de la fibra fotónica de núcleo líquido.

Resultados experimentales

Una vez que se ha fabricado la muestra (sistema de llenado con la fibra de cristal fotónico de núcleo hueco), ésta es introducida en el arreglo polarimétrico para la evaluación de la birrefringencia. Previamente se verifico la alineación del arreglo, posteriormente se realizó un marco de referencia el cual consiste en fijar una polarización conocida (lineal), para el momento en que se integra la muestra poder identificar la contribución en la polarización.

En un principio se realiza la evaluación de la muestra, sin alterar las características físicas de la fibra original. Esta evaluación se lleva a cabo rotando el ángulo azimutal del haz de luz linealmente polarizado que se acoplará a la fibra. Esto se realiza, para cada longitud de onda, rotando el eje del prisma polarizador de calcita de 0 a 180 grados. Posteriormente se sintoniza otra longitud de onda y se repite el mismo experimento (para generar un barrido espectral).

Una vez concluidos los experimentos para evaluar la birrefringencia de la muestra de fibra hueca, su núcleo se infiltra con un líquido quiral. Esto conlleva una pausa de 24 horas esperando el llenado de la fibra por capilaridad. Al terminar este tiempo se evalúa el cambio en la birrefringencia de la muestra. Se construyeron tres muestras, una para cada uno de los tres líquidos quirales utilizados [Licor de café Kahlúa, (R-) Limoneno y (R-, S-) Linalilo].

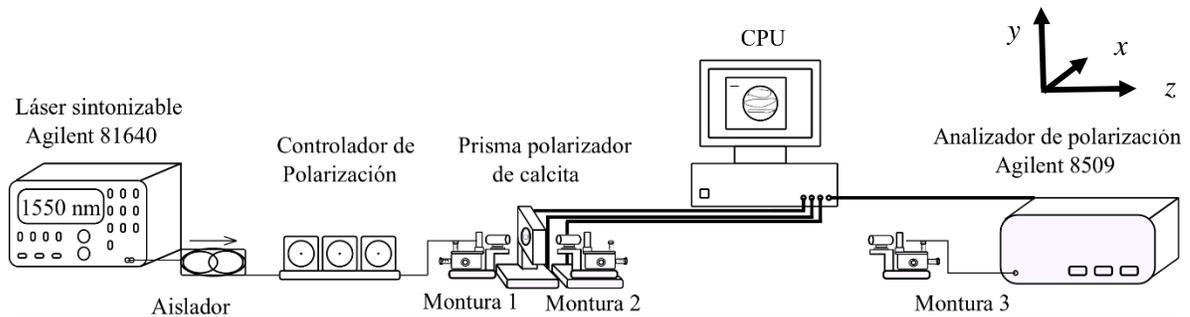
En este capítulo se presentan los cambios que experimentó el estado de polarización de la señal al propagarse por la muestra con un núcleo líquido, para cada uno de los tres líquidos utilizados.

4.1 Arreglo usado para evaluar la birrefringencia de las muestras

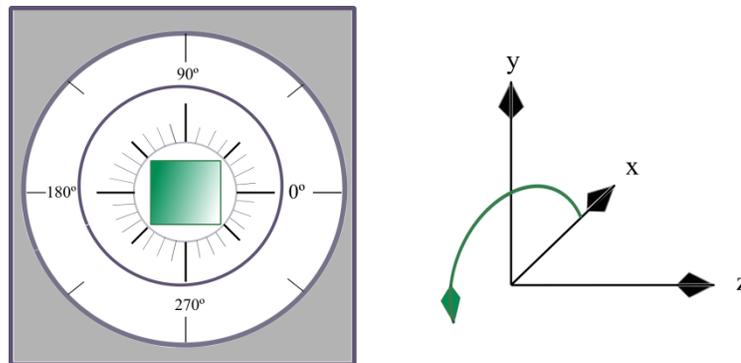
En la Figura 29 se puede observar el esquema estructural del arreglo experimental y cada una de las partes que lo componen.

Este arreglo tiene como fuente de luz un láser sintonizable Agilent 81640, que opera sobre una banda espectral que va de 1280 a 1640 nm. A este láser se le conectó un aislador óptico (para protegerlo de luz reflejada porque lo desestabiliza), seguido de un controlador de polarización. La fibra saliente del extremo

libre del controlador de polarización llega hasta una montura de traslación XYZ (Montura 1). En esta montura se encuentra un objetivo de microscopio que colima el haz proveniente del láser sintonizable. El haz colimado viaja por aire hasta otra montura de traslación (Montura 2) y en su camino adquiere un estado de polarización lineal al atravesar el prisma polarizador de calcita. Estos dos últimos elementos pueden ser retirados del arreglo y repositionados en forma precisa, ya que se encuentran colocados sobre bases de traslación micrométrica automatizadas.



a)



b)

Figura 29. a) Arreglo para el análisis de polarización. b) Giro del polarizador.

Si se retiran el prisma polarizador y la Montura 2, el haz viaja de la Montura 1 hasta la siguiente montura de acoplamiento (Montura 3). Con ayuda del objetivo de microscopio de esta última montura, el haz colimado se enfoca sobre la fibra estándar conectada al analizador de polarización.

El espacio libre de dispositivos ópticos que se encuentra después de la Montura 2, está pensado para colocar las muestras cuya birrefringencia se desea evaluar.

4.1.1 Alineación del arreglo experimental

El arreglo está ideado de tal forma que sólo es necesario conectar la muestra a la Montura 2 y a la lente colimadora (Colimador) para realizar las mediciones.

Sin embargo, el sistema no opera en un ambiente perfecto, las condiciones ambientales (temperatura, vibraciones) no son estables, por lo que para cada conjunto de medidas fue necesario realinear los elementos involucrados.

Para realizar la alineación se modifica ligeramente el arreglo. Se conecta la salida de la Montura 2 directamente al analizador de polarización por medio de una fibra convencional de 2 m de largo.

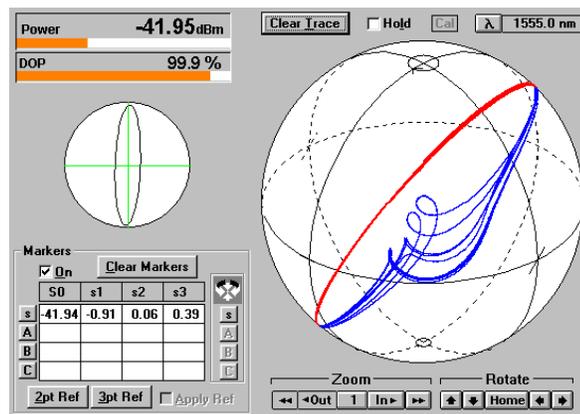


Figura 30. Evidencia del arreglo experimental desalineado.

El siguiente paso es alinear la Montura 2 con el haz proveniente de la Montura 1, hasta obtener la máxima potencia de acoplamiento (alrededor de -11 dBm) en la fibra que va al analizador de polarización. En la Fig. 30 se muestra un conjunto de resultados. Puede apreciarse que se trabajó con una potencia de salida de -41 dBm. Las trazas azules muestran una discontinuidad no deseada en la evolución del estado de polarización, que depende de la longitud de onda de la señal utilizada. Aunque pudiera indicar un defecto en esta muestra, en este caso es un defecto en la alineación.

Una vez obtenida una transmitancia máxima, y trazas que no exhiban discontinuidades, se reposiciona el prisma polarizador con ayuda de la base motorizada. Manipulando el controlador de polarización se trabajó tratando de igualar las potencias de salida medidas al ajustar el eje del prisma polarizador en los ángulos

de 0, 60, 180, 240, 300 y 360 grados; sobre todo igualando entre sí las potencias de salida medidas para los ángulos que en teoría deberían coincidir, como 0° y 180° .

Habiendo obtenido la menor variación de potencia al hacer girar el prisma de 0 a 180 grados, el último paso es ajustar la Montura 2 de tal manera que dé una potencia de alrededor de -30 dBm, para que al variar la orientación del eje del polarizador, la señal pueda detectarse a cualquier ángulo. Ajustando la posición longitudinal de la cara de entrada con ayuda del tornillo micrométrico del eje z (Montura 2) se consiguió que la evolución del SOP de salida describiera un círculo continuo.

Para alinear la Montura 3 se retiran tanto el prisma, como la fibra monomodo estándar de 2 m de la Montura 2 que va conectada al analizador, y se reconecta la fibra convencional que parte de la Montura 3. El procedimiento de alineación de la Montura 3 es idéntico al usado para la Montura 2.

4.1.2 Introducción de la muestra en el arreglo

Una vez que la alineación en el arreglo de los dispositivos ópticos críticos otorga una potencia de salida adecuada para realizar los experimentos, el siguiente reto es alinear la muestra.

En este caso la dificultad se debe a las bajas potencias para las que el láser sintonizable se mantiene estable en el rango de longitudes de onda de operación. El rango de trabajo abarca sólo longitudes de onda en el infrarrojo cercano, lo que significa que se tiene luz no visible y con una potencia de alrededor de -30 dBm (potencia saliente de la Montura 2). Alinear con luz no visible con una potencia tan baja no es fácil. La solución fue acoplar inicialmente luz de un láser HeNe de 632 nm (luz en el rango visible) a una de las puntas de fibra SMF-28e. En la Figura 31 se muestra una imagen de este paso.

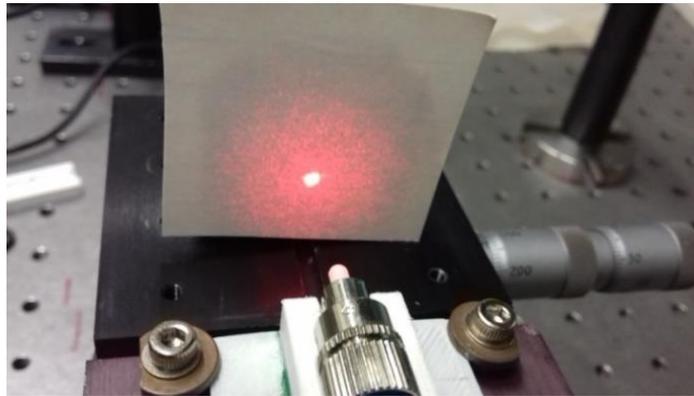


Figura 31. Alineación usando un láser HeNe.

Una vez que se acopló el haz proveniente del láser HeNe a lo largo de toda la muestra (Figura 32), se procedió a realizar la alineación con luz infrarroja de 1550 nm. Para esta actividad fue necesario utilizar un diodo láser DFB. Esta fuente de luz no es sintonizable, pero permite trabajar con una potencia más alta y ajustarla para que sea visible en la tarjeta de prueba IRC32R, sensible al infrarrojo.

Una vez que se ajusta la potencia del diodo láser, éste se conecta a la muestra por medio de una de las fibras SMF-28e. La otra fibra SMF-28e se conecta con la fibra de 2 m que va directo al analizador de polarización, alineando con ambas monturas de la muestra hasta obtener la potencia más alta. En la Figura 33 se observa un esquema del arreglo usado en la Figura 32, en el que ya se incluye a la muestra.



Figura 32. Alineación de la muestra de ambas monturas con haz láser de 632 nm (rojo).

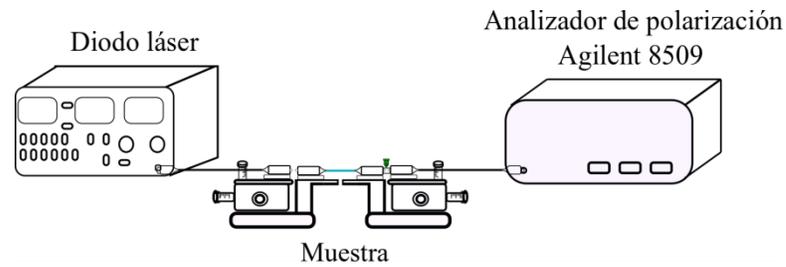


Figura 33 Arreglo simplificado para facilitar la alineación de la muestra.

El último paso consiste en conectar la fibra estándar a la entrada de la muestra a la Montura 2 del arreglo experimental, y alinear la lente colimadora de la Montura 2 con la lente correspondiente de la Montura 3.

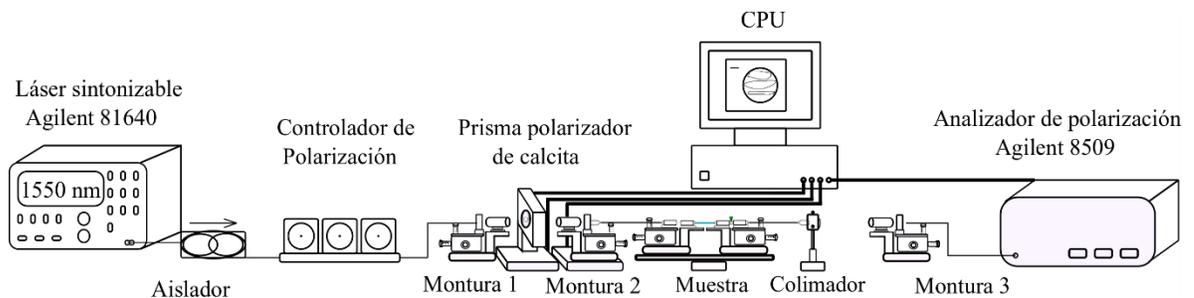


Figura 34 Arreglo experimental con la muestra.

Para evaluar el cambio en el estado de estado de polarización inducido por la birrefringencia del líquido quiral, es necesario conocer la contribución inicial del arreglo sin líquido quiral. El arreglo polarimétrico usado para este fin se muestra en la Figura 34.

4.1.3 Marco de referencia

Para iniciar las mediciones es necesario realizar un ajuste que consiste en generar el marco de referencia usado para definir los estados de polarización.

El procedimiento seguido para crear este marco de referencia permite, con ayuda del programa de computadora, desprestigiar todas las contribuciones al estado de polarización generadas después de la punta de salida de la muestra, y trazar el estado de polarización de salida sobre la esfera de Poincaré.

Esto se logra ajustando el controlador de polarización del arreglo sin el prisma, la Montura 2, la muestra y el colimador. Se genera en la esfera de Poincaré un SOP colocado en alguno de los polos como se puede observar en la Figura 35 b) (estado de polarización cercano al circular izquierdo).

A continuación, se coloca el prisma de polarización en el arreglo. El marco de referencia se define con base en tres estados de polarización lineales. Para ello primeramente el eje del prisma polarizador debe orientarse a 0° , y con el programa se guardan los vectores de Stokes en la marca A. Se hace girar el polarizador a 60° para marcar el punto B, y por último a 120° y se marca el punto C. Se aplican estos 3 puntos de referencia para calibrar el programa. Lo siguiente es realizar una prueba regresando el prisma de 120° a 0° ; el resultado debe ser una polarización lineal (Figura 35 c)). De no ser así, se retira el prisma y se comprueba si el sistema tiene el estado de polarización circular inicial (Figura 35 d)), ajustando la orientación de la esfera de Poincaré en el hemisferio donde se encontraba inicialmente la traza y realizando un acercamiento para corroborar que el estado de polarización medido esté justo en el centro del círculo donde se cruzan las dos líneas que se pueden observar en la Figura 35 b) (SOP circular).

De no estar el punto en el centro, se realiza de nuevo el procedimiento seguido para generar el marco de referencia. Se repite el procedimiento partiendo del estado de polarización circular, hasta que al variar la orientación del eje del prisma de 120° a 0° , la lectura del analizador de polarización coincida con la del punto A.

A lo largo de este trabajo se encontró que en general es necesario realizar el procedimiento tres veces, lo cual permite una calibración óptima para dar inicio a la evaluación polarimétrica de la birrefringencia.

Cuando se va a realizar una medición se genera primero el marco de referencia, posteriormente se toman las mediciones cuando el prisma gira de 0 a 180 grados (A. Rojas-Sánchez, 2019); estos datos son guardados generando un archivo de Excel (Figura 36). Al cambiar de longitud de onda es necesario generar un nuevo marco de referencia con dicha longitud de onda.

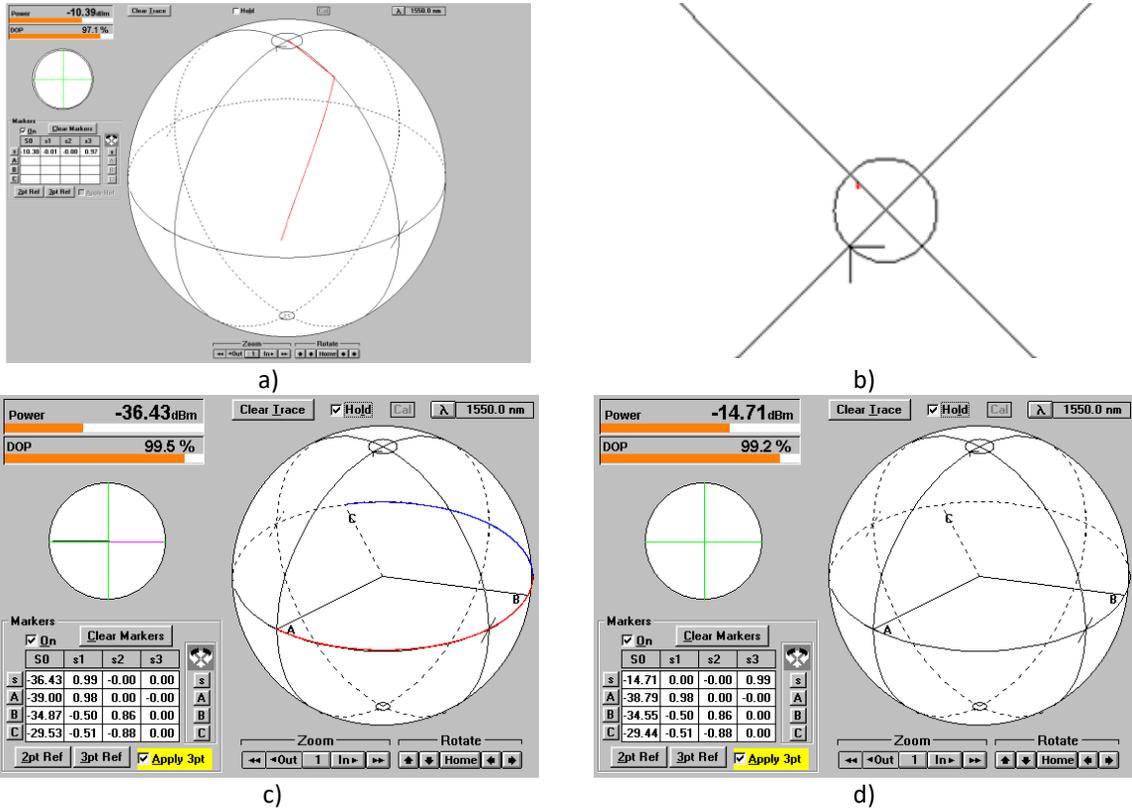


Figura 35. Generación del marco de referencia. a) Ajuste del controlador de polarización para obtener una polarización circular. b) Captura de pantalla de un hemisferio de la esfera. c) Polarización lineal con los 3 puntos de referencia. d) Polarización circular, cuando se retira el prisma de polarización.

	A	B	C	D	E	F	
1	Angulo	P	S1	S2	S3	DOP	
2		0	6.29E-06	-0.7497451	-0.6228605	1.24E-02	0.9747954
3		1	6.35E-06	-0.7437972	-0.6301755	2.13E-02	0.9750935
4		2	6.77E-06	-0.7440273	-0.6306575	2.80E-02	0.97575
5		3	6.98E-06	-0.7405453	-0.6354891	4.56E-02	0.9769016
6		4	6.61E-06	-0.7493814	-0.6243663	4.84E-02	0.9766013
7		5	6.51E-06	-0.7442322	-0.6295858	5.38E-02	0.9762934

Figura 36. Captura de pantalla de Excel donde se observa el barrido grado por grado y los datos obtenidos.

Las mediciones en las que se variaba el ángulo azimutal de 0 a 180 grados tenían una duración aproximada de 9 minutos y generar un marco de referencia (colocando ligeramente a un lado la muestra y el colimador) requería de un tiempo y esfuerzo considerables, por lo que se optó por realizar las mediciones usando una longitud de onda para generar el marco de referencia y con ese marco se trabajó con tres valores cercanos más. En un conjunto de medidas, usando 1550 nm para el marco de referencia, se trabajó también con 1552, 1554 y 1555 nm. Y con el láser sintonizado a 1555 nm se generó un nuevo marco de referencia y se tomaron las mediciones para las longitudes onda de 1557, 1559 y 1560 nm.

4.2 Primer fibra

La primer fibra de cristal fotónico de núcleo hueco, con conectores en sus extremos, es un tramo de 11.7 cm de largo. Se realizaron mediciones sintonizando el láser con las siguientes longitudes de onda: 1540 nm (M R), 1542 y 1544 nm; 1545 nm (M R), 1546 y 1548 nm; 1550 nm (M R), 1552 y 1554 nm; 1555 nm (M R), 1557 y 1559 nm; 1560 nm (M R), 1561, 1562, 1563, 1564 y 1565 nm. Se generó un marco de referencia para las longitudes de onda marcadas (M R). Todas las mediciones se graficaron con ayuda del programa Matlab y considerando la fuerte contribución de la alineación y la falta de un medio ambiente estable, fueron descartados los resultados que no mostraron un perfil estable, aproximadamente circular.

Posteriormente se realizó una medición con el diodo láser en lugar del láser sintonizable. Esta medida adicional se introdujo debido a que la baja potencia de emisión de la fuente sintonizable pudiera resultar insuficiente al infiltrar en el hueco de la fibra un líquido quiral. En este caso es probable que debido a la reducción de la potencia producida por la transmitancia del líquido, se requiera de una potencia mayor.

4.2.1 Barrido azimutal del estado de polarización a varias longitudes de onda

Para los resultados de salida medidos al variar el ángulo azimutal del SOP de entrada, se registra una variable P con la información de la potencia promedio medida, y se guardan los parámetros de Stokes S_1 , S_2 y S_3 del SOP de salida (Figura 36). Una vez obtenidos estos resultados el siguiente paso es normalizar los valores.

Esto se hace obteniendo primero un factor para cada ángulo, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$f = \sqrt{S1^2 + S2^2 + S3^2} \quad (36)$$

Al obtener este factor es posible calcular los valores de los parámetros de Stokes normalizados Sn a partir de los originales:

$$\begin{aligned} Sn_1 &= S1/f \\ Sn_2 &= S2/f \\ Sn_3 &= S3/f. \end{aligned} \quad (37)$$

Esto se repite para todos los vectores de Stokes de cada ángulo azimutal del eje del polarizador. Se normalizaron los valores para eliminar la distorsión introducida por el cambio en la potencia, producido al girar el polarizador (debido a que las caras de entrada y salida no son paralelas).

Para esta primera muestra de fibra los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 37, 38 y 39. En ellas, cada curva corresponde a medidas realizadas con una longitud de onda distinta. Las curvas se etiquetaron usando un color diferente, señalado en los recuadros.

En la Figura 37 se observan cambios fuertes entre las posiciones y orientaciones de los círculos generados con los SOP de salida, resultantes de la variación del ángulo azimutal del SOP de la señal de entrada linealmente polarizada (obtenida al variar la orientación del eje del polarizador). Sin embargo, en los resultados mostrados en la Figura 38 inciso a), parece haber un eje de simetría común para las curvas asociadas a todas las longitudes de onda, excepto 1542 y 1557 nm. Pero, al analizarlas con una orientación diferente de la esfera [inciso b)] resulta evidente que las circunferencias no tienen la misma inclinación.

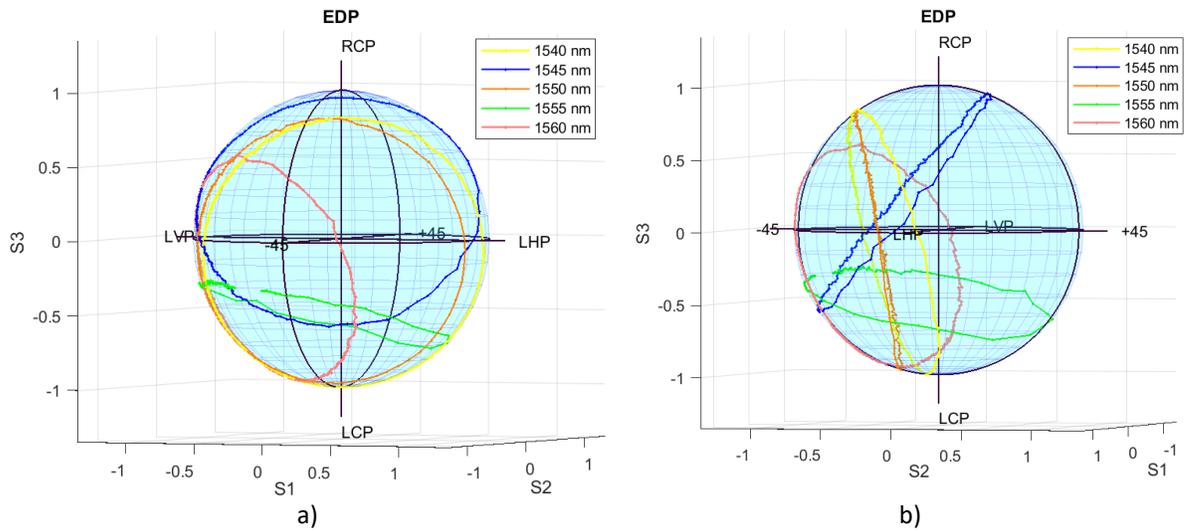


Figura 37. SOP de salida medido al variar la orientación del eje del polarizador para longitudes de onda para las que se usó un marco de referencia generado para 1550 nm. Esfera orientada con: a) la vista frontal de la traza naranja. b) la vista lateral de la traza naranja (1550 nm).

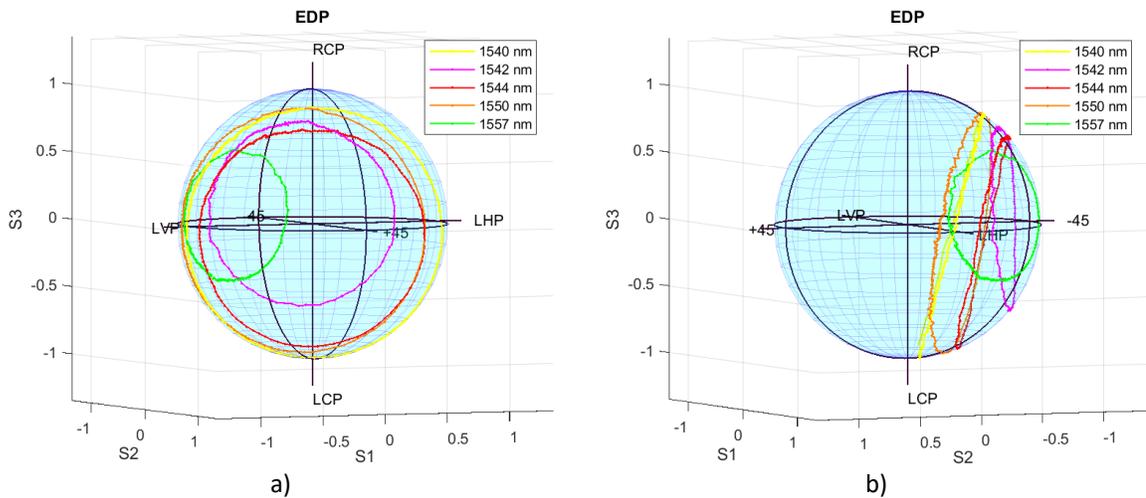


Figura 38. SOP de salida medido al variar la orientación del eje del polarizador para longitudes de onda entre 1540 y 1557 nm. Esferas orientadas con: a) la vista frontal de la traza amarilla. b) la vista lateral de la traza amarilla (1540 nm).

El conjunto de datos de la Figura 39 corresponde a la región espectral cercana a 1540 nm. Se generó un marco de referencia con dicha longitud de onda y se realizaron mediciones sintonizando el láser usando incrementos de 2 nm, hasta llegar a 1550 nm (nuevo marco de referencia). La mayoría de las circunferencias se muestran en los resultados de la Figura 38, con excepción de la traza de 1548 nm, la cual se encuentra cerca del ecuador (Figura 39 a)). Al rotar la esfera, esta traza en particular se encuentra sobre la superficie de la esfera (Figura 39 b)); se obtuvo un círculo mayor para esta longitud de onda. Se agregó un resultado

más a este análisis, asociado al uso de 1545 nm para generar el marco de referencia, con la intención de tener más información en este rango de trabajo. Los resultados obtenidos se analizan en una vista frontal de esta longitud de onda de la Figura 39 c) y con la idea de tener otra perspectiva de este resultado se tiene una vista de perfil en la Figura 39 d).

Debido a la dependencia de la alineación con la temperatura, a partir de estas figuras se seleccionaron las longitudes de onda para las que las condiciones ambientales fueron similares (1542, 1544, 1546, 1557, 1560 nm). Usando los vectores de Stokes de salida medidos para dichas longitudes de onda, se construyeron trazas de barrido espectral agrupando los SOP de salida asociados a señales de entrada con el mismo ángulo azimutal. Se usaron ángulos azimutales entre 0 y 60 grados, espaciados 10 grados. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 40.

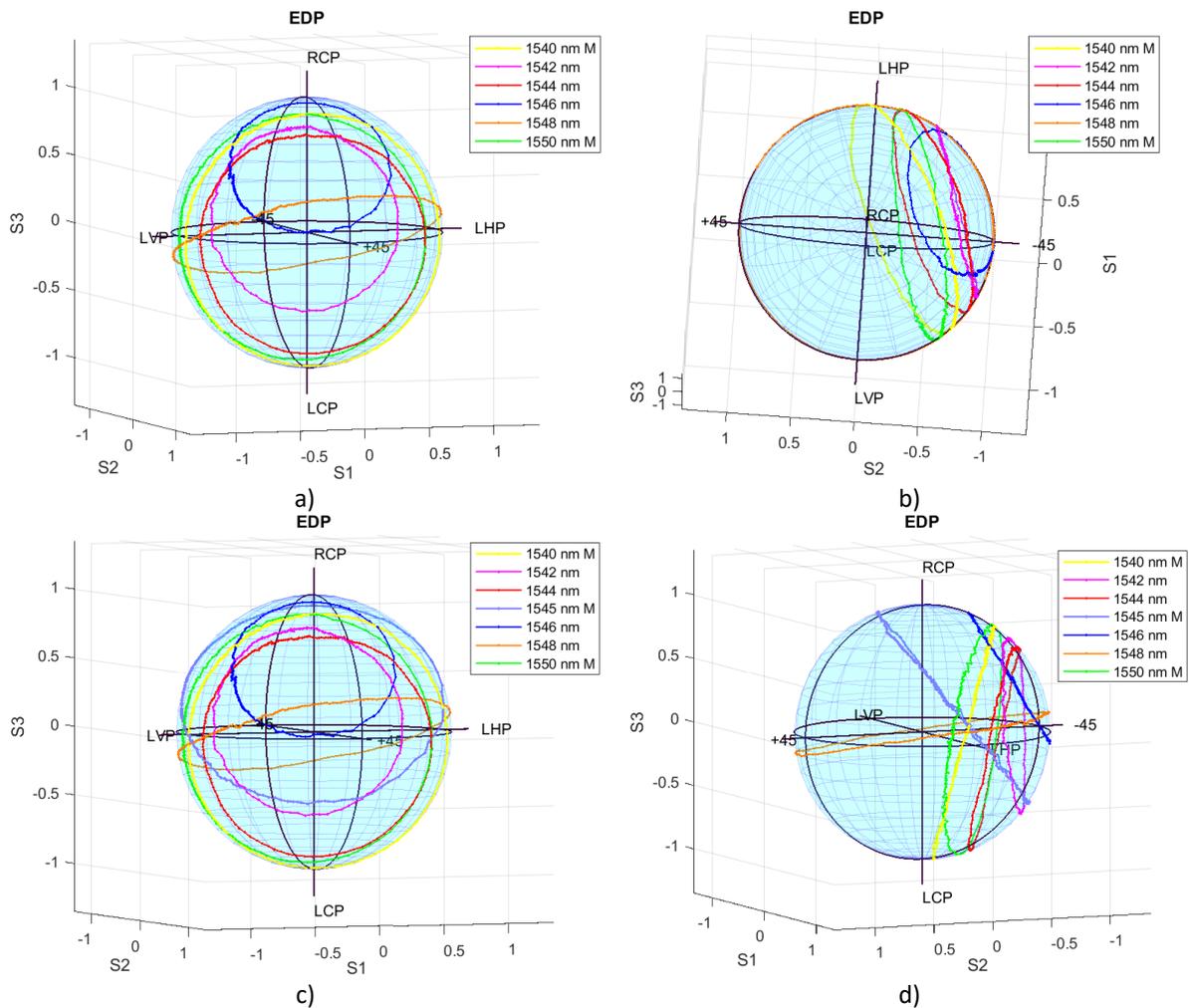


Figura 39 Resultados de barrido espectral iniciando de 1540 nm a 1550 nm. a) Vista frontal de 1548 nm. b) Vista lateral de 1548 nm. c) Vista frontal de 1545 nm, se observa una similitud con la traza de 1546 nm. d) Perfil de 1545 nm, donde se puede apreciar como línea recta al igual que 1540 nm y 1546 nm, las trazas de 1545 nm y 1546 nm a simple vista son paralelas entre sí.

En la figura 40, el cambio en el ángulo de retardo δ entre los modos de polarización. Para las longitudes de onda de los extremos de todo el barrido los ángulos de retardo resultaron ser $\delta(1540) = 144.97^\circ$ y $\delta(1560) = 154.84^\circ$ produciendo un retardo entre los modos de polarización de 9.871° . Sustituyendo en la ecuación 30, se obtiene que la longitud de batimiento de la polarización para esta muestra es 0.0554 m.

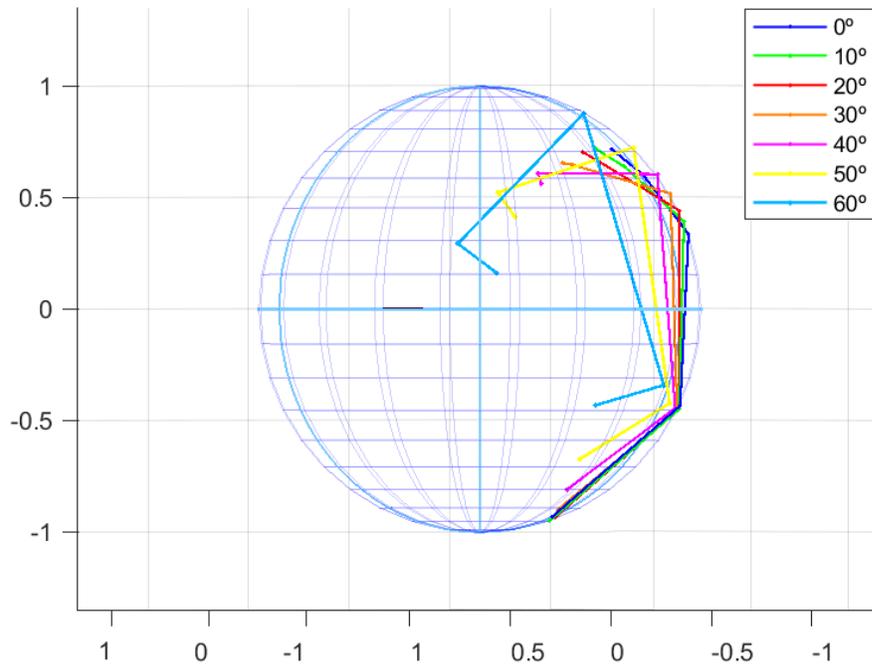


Figura 40 Resultados de barrido espectral construidos con datos para los que las condiciones ambientales fueron similares (1542, 1544, 1546, 1557, 1560 nm).

4.2.2 Diodo láser como fuente de luz

En estas pruebas se utiliza el mismo arreglo polarimétrico, variando la fuente de luz utilizada. En la Figura 41 se observa el esquema del arreglo óptico usado para estas mediciones.

Los resultados obtenidos, con el diodo operado con una corriente de alimentación de 21 mA se muestran en la Figura 42, con una prueba rápida de barrido azimutal. Y en la Figura 4.15 se presenta la traza obtenida al variar, grado por grado, de 0° a 180° , el ángulo azimutal del SOP de entrada.

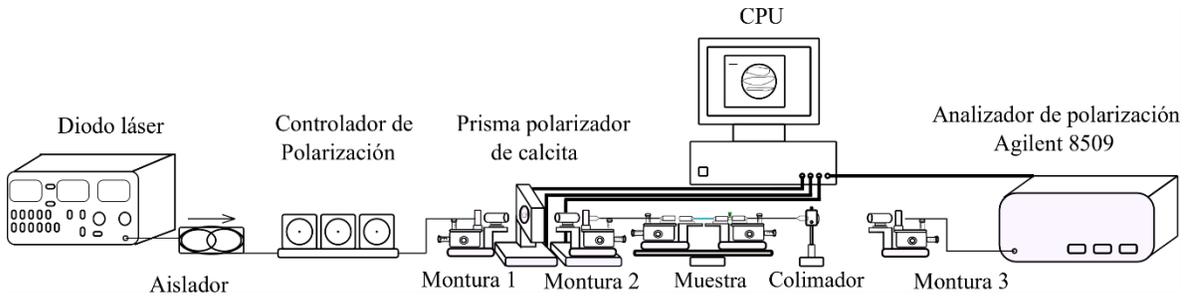


Figura 41 Arreglo experimental con diodo láser como fuente.

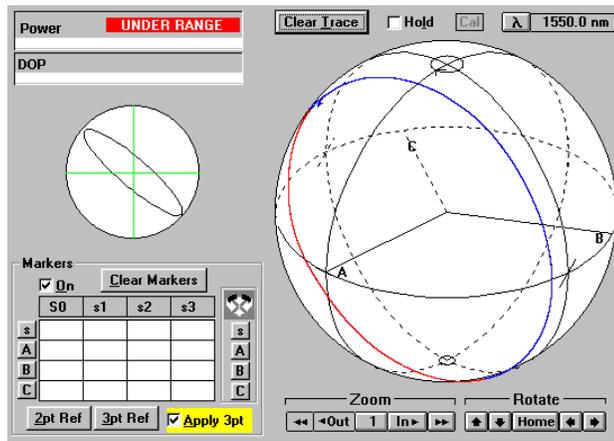


Figura 42 Medición rápida de 0° a 180° grados, con nueva alineación.

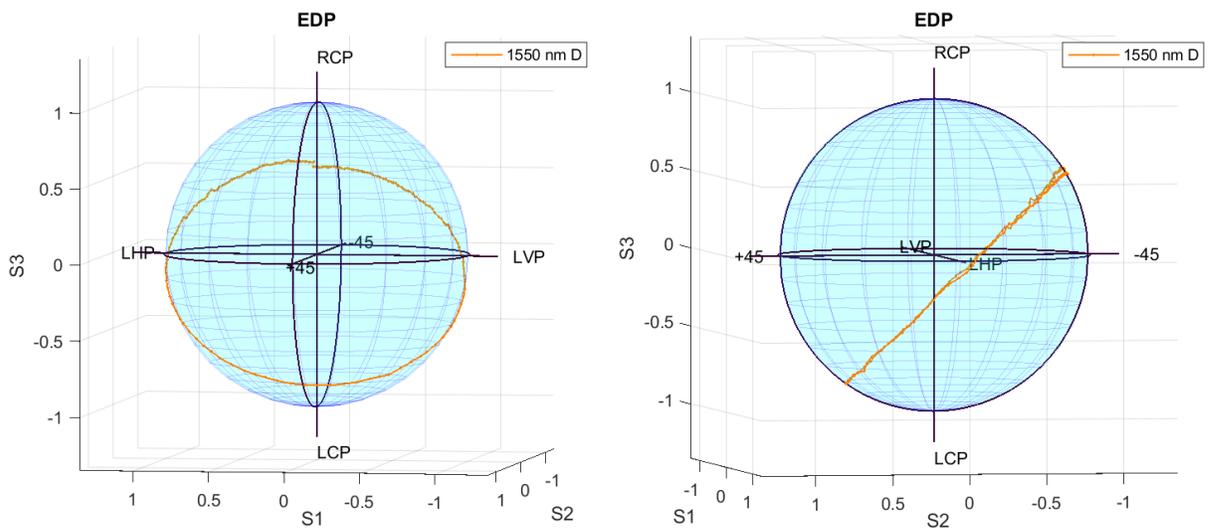


Figura 43 Barrido azimutal (0 a 180 grados) del estado de polarización lineal de entrada.

Aplicando el procedimiento desarrollado por A. Rojas-Sanchez *et al.* A los datos medidos para 1550 nm, usando como fuente de luz al diodo láser DFB, se encontró que para esta muestra los ángulos azimutal y de elipticidad del eje rápido son de 122.93 y 20.99 grados respectivamente. El cambio se debe a la dispersión de la birrefringencia, el cual será necesario estudiar con mayor detalle en trabajos futuros.

4.2.3 Líquido quiral Kahlúa

Una vez caracterizada la birrefringencia de la primera muestra construida, fue posible comenzar a infiltrar el líquido en el núcleo de la fibra. Se inyectó líquido en el sistema de llenado de la muestra (Figuras 44 y 45) y se esperó 24 horas. Al transcurrir este tiempo, sin alterar la posición de algún componente del arreglo, la señal de salida no pudo ser detectada por el analizador de polarización. Se optó por cambiar la fuente de luz del arreglo introduciendo el diodo láser DFB, Figura 41 y retirando el diodo láser sintonizable (Figura 34). Tampoco se obtuvo una señal de salida medible.

Por último, se intentó con un arreglo más simple donde se incluyen únicamente el diodo láser, la muestra y el analizador de polarización (Figura 33). Como salida, en vez de obtener un SOP fijo, ya que no se varió el ángulo azimutal del SOP lineal generado por el prisma polarizador (Fig. 46), el resultado fue una evolución caótica del estado de polarización, sin tener algún patrón que se pudiera distinguir.

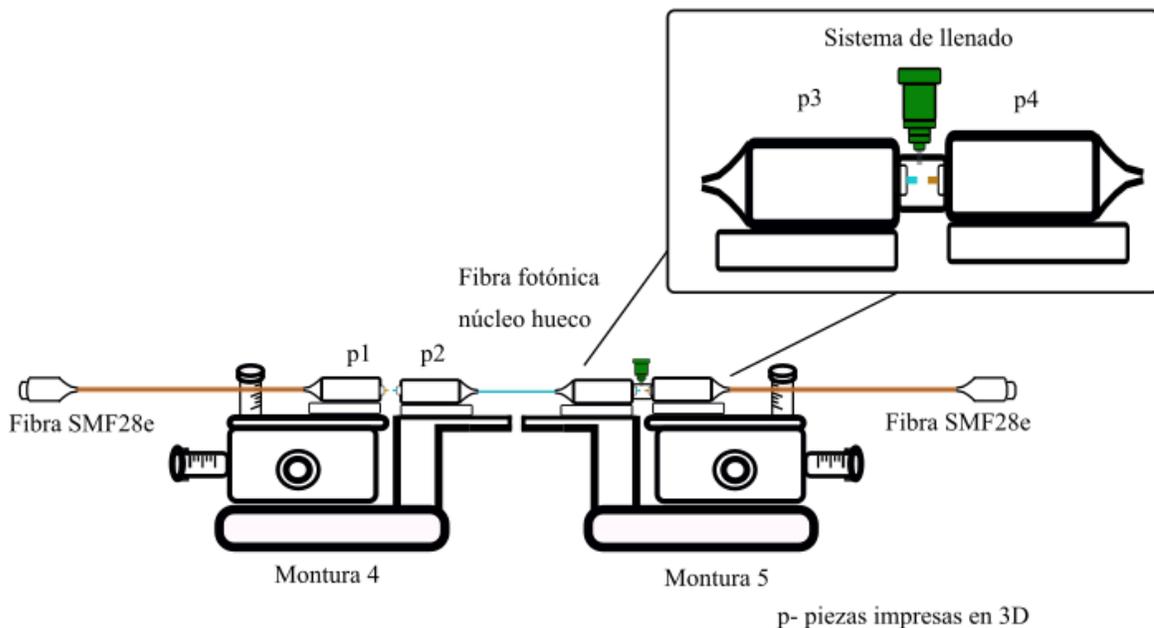


Figura 44 Esquema de la muestra y acercamiento al sistema de llenado.

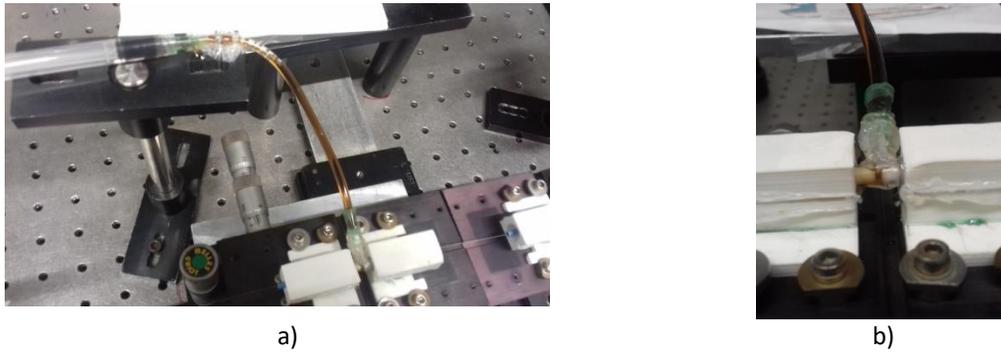


Figura 45 Llenado de fibra de núcleo hueco por capilaridad. a) Jeringa con manguera directo al sistema de llenado. b) Fotografía lateral del sistema de llenado, se observan las dos férulas y el líquido entre ellas.

Con el transcurso de los días, al experimentarse cambios ambientales en la temperatura y humedad, se observaron variaciones significativas en el estado de polarización de salida. Como se ha mencionado, un factor crucial para este experimento es la temperatura. Fue evidente que inclusive la presencia de un observador cambia la variación del estado de polarización al acercarse a la muestra, esto es debido al calor corporal del observador.



Figura 46 Resultados del SOP de salida obtenidos usando el arreglo de la Figura 44 para la fibra de núcleo líquido infiltrada con licor de café. A pesar de que el ángulo azimutal del SOP de entrada se mantuvo fijo, se obtuvieron trazas que muestran una evolución caótica del estado de polarización.

Se encontró que la punta de la fibra óptica estándar se contaminó con el líquido quiral al infiltrarlo en el núcleo hueco de la fibra de cristal fotónico. Después de recortar esta punta, fue posible utilizar el arreglo de la Figura 41, ajustando la corriente de alimentación del diodo láser a 23 mA. Se generó el marco de

referencia a 1550 nm (longitud de onda del diodo láser DFB), se introdujo el prisma polarizador y se realizaron las mediciones asociadas al giro del eje de polarización del prisma de 0° a 180° (Figura 47).

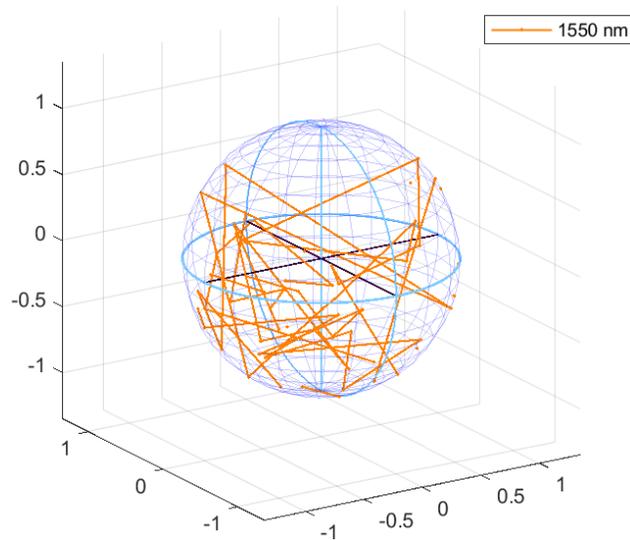


Figura 47 Traza de la evolución del estado de polarización de salida medido al variar el ángulo azimutal del SOP de entrada. La discontinuidad de la traza indica que la birrefringencia de la muestra no se mantuvo constante durante el proceso de medición.

Una vez finalizado el barrido del ángulo azimutal, al detenerse el prisma y capturar los datos obtenidos, se realizó una captura de imagen de la esfera de Poincaré resultante de este experimento para un ángulo azimutal del SOP de entrada fijo (Figura 48). Los resultados de las figuras 47 y 48 indican que las vibraciones introducidas al rotar el prisma usando la montura mecánica automatizada desestabilizaron mecánicamente al fluido contenido en el núcleo de la fibra.

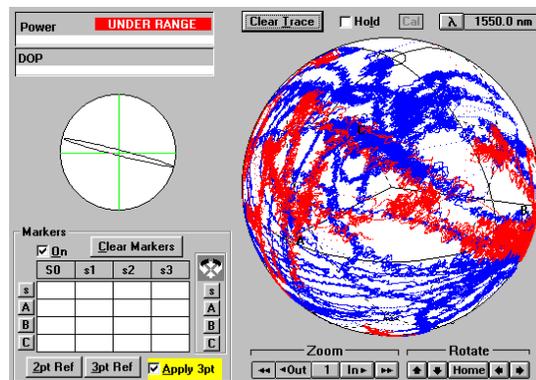


Figura 48 Captura de pantalla de la esfera de Poincaré después de realizar el barrido azimutal del eje del polarizador. En este caso el ángulo azimutal del SOP lineal de entrada se mantuvo fijo. La traza indica que la birrefringencia de la muestra varió continuamente durante el proceso de captura de datos.

Debido a la inestabilidad ambiental, se optó por realizar una prueba rápida girando el polarizador de 0° a 180° (Figura 49). En este caso se logró visualizar gran parte de la traza circular de salida esperada, la cual se cortó cuando la potencia de salida era menor a la que detecta el analizador de polarización.

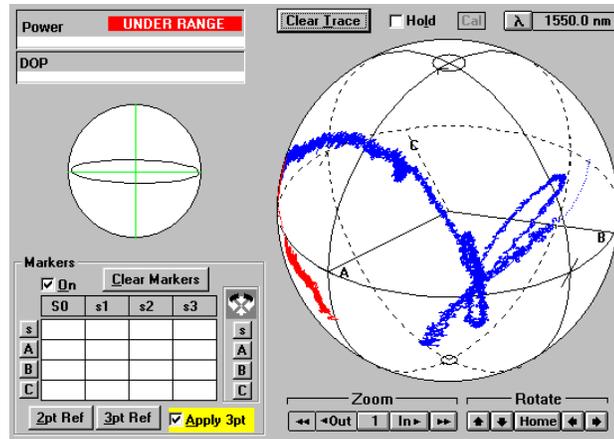


Figura 49 Captura de pantalla en el instante en que dejo de girar el polarizador.

Comparándola con la traza obtenida para la muestra sin líquido a esta longitud de onda (Figura 37) se encuentra que el eje de simetría de la traza sigue centrado sobre un punto cercano al ecuador. Inicialmente el eje de simetría se encontraba cerca del plano meridional que cruza por -45 grados; mientras que para la muestra con el licor de café el plano que contiene al eje de simetría presenta un giro hacia el punto A; i.e., hacia 0 grados.

Con base en esta observación, puede pensarse que la infiltración con este líquido generó una birrefringencia circular de mano derecha en la fibra de núcleo líquido. Cabe hacer notar que, de acuerdo a las medidas de la actividad óptica realizadas, este líquido es dextro-rotatorio.

4.3 Segunda muestra de fibra

Haciendo uso del mismo tipo de fibra de cristal fotónico de núcleo hueco (HC-PCF) se construyó una segunda muestra, con un tramo de 10.2 cm. Se le agregó un conector en una punta de la fibra y en el otro extremo se realizó únicamente un corte, la muestra quedó estructurada como se muestra en el diagrama de la Figura 50.

Se realizaron mediciones sintonizando el láser con las siguientes longitudes de onda: 1540 nm (M R), 1542 y 1544 nm; 1545 nm (M R), 1546 nm y 1548 nm; 1550 nm (M R), 1552 y 1554 nm; 1555 nm (M R), 1557 y 1559 nm; 1560 nm (M R), 1561, 1562, 1563, 1564 y 1565 nm. Se generó un marco de referencia con las longitudes de onda marcadas como M R y se eligieron los mejores resultados.

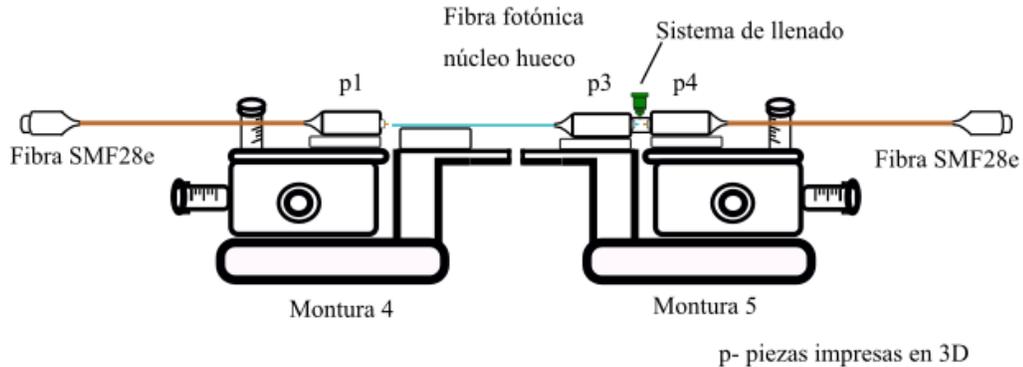


Figura 50 Muestra con la segunda fibra fotónica.

4.3.1 Barrido azimutal para diferentes longitudes de onda

Con este nuevo tramo de fibra se realizó el barrido azimutal del SOP de la señal de entrada, de la misma manera que en la primera fibra, usando las longitudes de onda y los procedimientos de calibración del marco de referencia mencionados anteriormente. Se graficaron las trazas de los resultados obtenidos seleccionando sólo las circunferencias que mostraban continuidad. Los archivos seleccionados fueron normalizados (Ecuaciones 36 y 37) para ser graficados.

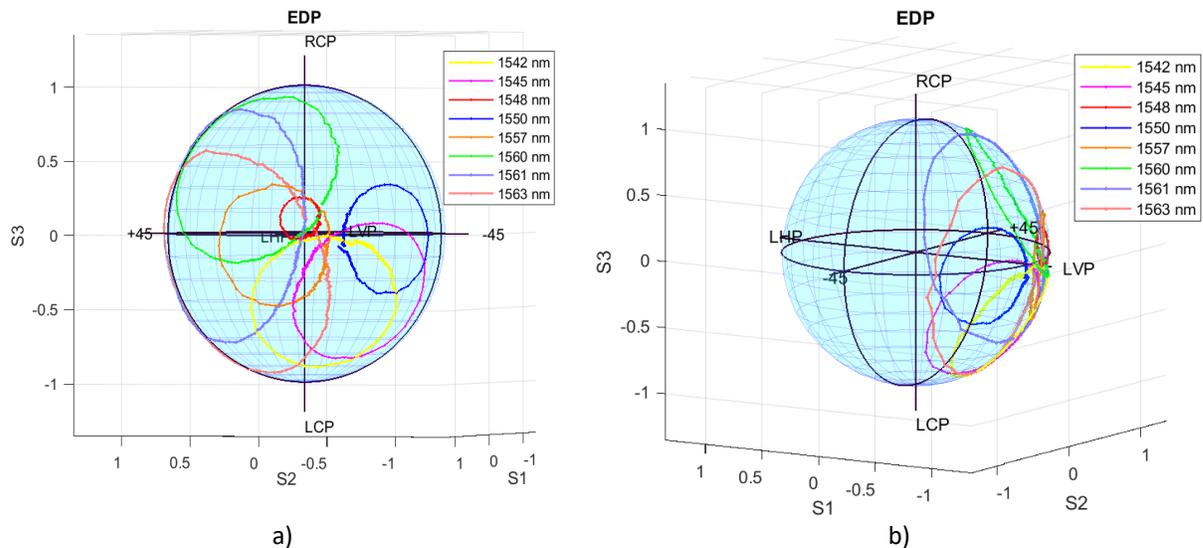


Figura 51 Resultados de barrido azimutal. Las circunferencias asociadas a las diferentes longitudes de onda no presentan un eje de simetría común, como se esperaría para una muestra con un retardo homogéneo (posición fija del eigenmodo). La mayoría está situada en una misma región de la esfera, estando muy cerca una circunferencia de la de otra, por lo que esto puede deberse a un cambio constante en la temperatura.

Los resultados obtenidos para las longitudes de onda seleccionadas se pueden observar en las trazas de la Figura 51. En este caso, el desplazamiento de los ejes de simetría de las trazas generadas por los estados de polarización de salida, no corresponden a un retardador homogéneo, por lo que con estos datos no es posible simular de un barrido espectral en longitud de onda, para proponer un valor aproximado para la longitud de batimiento de la polarización.

4.3.2 Diodo láser DFB como fuente de luz

Los resultados mostrados en la Figura 51 y las condiciones ambientales de la ciudad de Ensenada (condición Santa que favoreció la presencia de incendios en los municipios de Ensenada, Rosarito, Tijuana y Tecate) nos condujeron suponer que la temperatura ambiente estaba contribuyendo a modificar la birrefringencia de la muestra. Para minimizar esta contribución, se rediseñó el arreglo polarimétrico reemplazando la fuente láser sintonizable por un diodo láser DFB, Figura 41. En la Figura 52 se presenta el resultado de girar de manera continua (prueba rápida), el prisma polarizador de 0° a 180° . Se puede observar una trayectoria con algunas discontinuidades ligeras.

Se realizó la captura de datos girando de nuevo el polarizador, grado por grado, desde cero hasta 180° . El resultado obtenido (Figura 53) no concuerda completamente con el de la prueba rápida, lo cual puede deberse a que la temperatura del laboratorio no fue la misma para ambas mediciones. En la Figura 53 se pueden observar numerosas discontinuidades, e inclusive un defecto final en la continuidad de la trayectoria trazada sobre la esfera de Poincaré. Esto puede deberse a que el barrido azimutal es un proceso más lento.

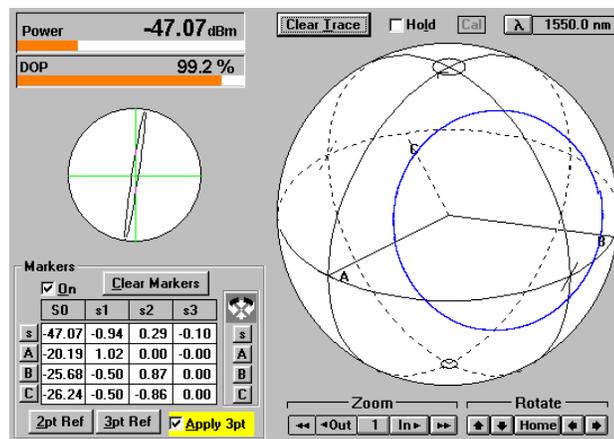


Figura 52 Resultado rápido de rotar el polarizador desde su posición inicial 0° hasta 180° .

En este punto es importante mencionar un efecto adicional, un notorio aumento de la humedad relativa en el ambiente (no se tiene un medidor para este fin), y por consiguiente en el laboratorio, durante el periodo en el que se realizó este experimento. Al manipular la fibra cerca del rostro, ésta se contaminó con la exhalación (problema que no se presentó con las pruebas de días anteriores) y fue necesario realizar un nuevo corte en el extremo contaminado. La longitud final de la fibra es la descrita al inicio de esta sección.

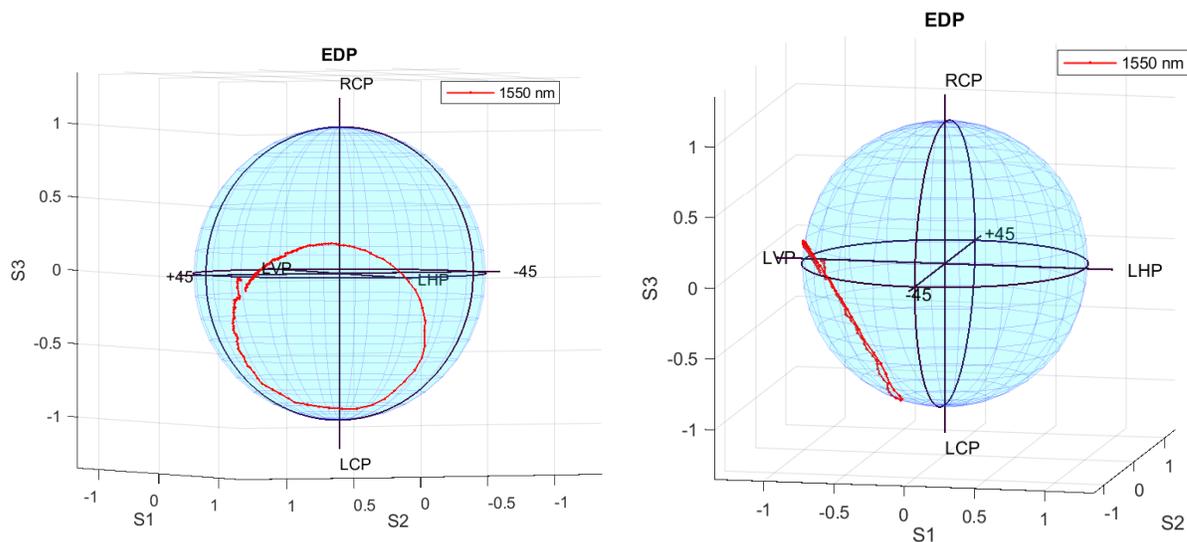


Figura 53 Resultado con circunferencia mal formada sin continuidad en la traza.

Debido a la humedad ambiental se consideró necesario detener el experimento debido a los cambios adicionales (figuras 52 y 53). Mientras que en la figura 51 el centro de simetría del círculo obtenido para 1550 nm se encuentra prácticamente sobre el ecuador, con un ángulo azimutal ubicado a la mitad entre -45 y 0 grados, su posición cambió en los resultados de las figuras 52 y 53. En las medidas realizadas usando el diodo láser DFB el centro de simetría se desplazó verticalmente hacia el polo asociado a SOP circular izquierdo y longitudinalmente hacia el eje horizontal (S_1).

4.3.3 Líquido quiral (R+)-Limoneno²

Se introdujo el líquido quiral (R)-Limoneno en el sistema de llenado durante 24 horas. Después de este periodo de tiempo se continuó trabajando con el arreglo de la Figura 41. En esta ocasión fue posible

² Dextro-limoneno.

observar resultados, sin necesidad de realizar un corte a la punta de fibra convencional (SMF-28e), que estuvo expuesta al Limoneno en el sistema de llenado.

En la Figura 54 se puede observar una traza en la esfera de Poincaré, obtenida sin haber repositionado el polarizador en el arreglo, y sin introducir variaciones en el SOP de entrada. En este caso la salida debió consistir sólo de un punto. Se permitió que se marcara la traza durante 5 minutos. Se puede apreciar que se forma una trayectoria circular ($\sim 75\%$ del círculo). Debe mencionarse que esta traza es un recorrido recurrente que se presentó durante los 5 minutos mencionados, y refleja el cambio en el estado de polarización de salida. Esto indica que la birrefringencia de la muestra, de nuevo varía en el tiempo.

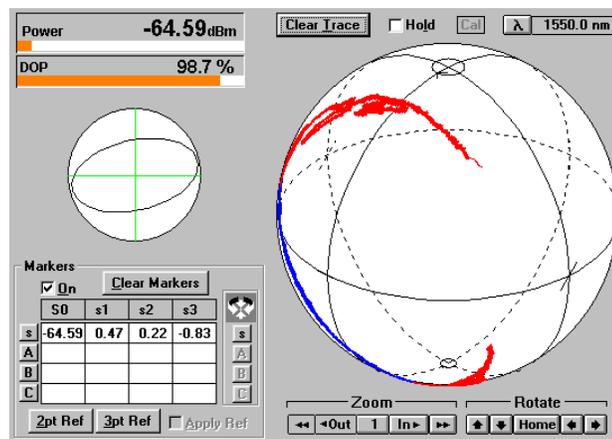


Figura 54 Traza del estado de polarización de salida obtenida para un periodo de tiempo de 5 minutos, manteniendo fijo el ángulo azimutal del SOP lineal de entrada. Debido a la inestabilidad ambiental se trabajó sin generar un marco de referencia.

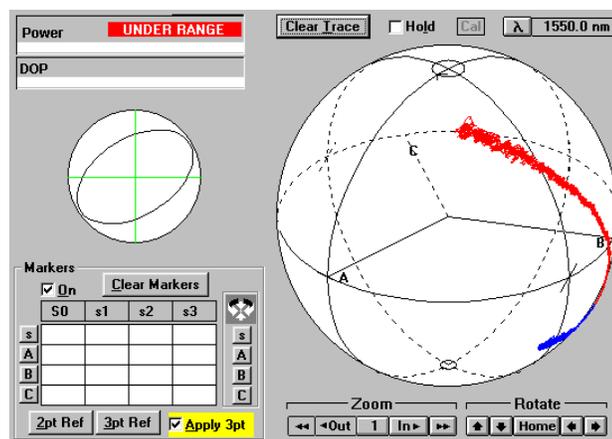


Figura 55 Corrida rápida de 0° a 180° obtenida habiendo generado el marco de referencia. Puede observarse un giro en la posición de la traza debido al cambio en la definición de la orientación de los ejes de la esfera de Poincaré.

Se esperó para tratar de que las condiciones ambientales en el laboratorio fueran más estables. El siguiente experimento consistió en generar el marco de referencia y realizar una prueba rápida haciendo girar el polarizador desde su posición inicial 0° , hasta 180 grados (Figura 55). Puede verse que la traza es simétrica con respecto a un punto ubicado cerca del ecuador, al igual que la traza para 1550 nm de la Figura 52. Puede decirse que el azimut del eje de simetría de la traza de la Figura 55 se encuentra cerca de 45° ; mientras que puede observarse que el de la Figura 51 se encuentra entre $S1$ y -45° . La birrefringencia de la muestra presenta una componente circular, habiendo girado en la misma dirección que para el licor de café. Éste sería el resultado esperado, ya que ambos líquidos poseen una actividad óptica de giro hacia la derecha.

La última prueba realizada con esta fibra de núcleo líquido se hizo con la intención de visualizar de una manera rápida, el efecto del cambio de temperatura. Se limpió la esfera de Poincaré y se acercó una lámpara de luz blanca (lámpara de arco de tungsteno), con la idea de utilizar el calor generado por la lámpara como perturbación externa.

Se realizó una impresión de pantalla al primer minuto de tener la lámpara cerca de la muestra (Figura 56 a)), otra captura cuando habían transcurrido otros 3 minutos (Figura 56 b)) y finalmente una impresión de pantalla al transcurrir 5 minutos de tener la muestra expuesta al calor de la lámpara (Figura 56 c)). Puede apreciarse la alta sensibilidad de la birrefringencia de la muestra a la temperatura.

Esto puede asociarse a que el índice de refracción de los líquidos exhibe una dependencia con respecto a la temperatura que es mayor que la de los sólidos en, al menos en un orden de magnitud [Olson y Horne, 1973; Waxler y Cleek, 1973]. Sin embargo, es importante recordar que aun para una fibra estándar, el cambio en la temperatura ambiente induce cambios severos en su birrefringencia [Fig. 8 en Tentori *et al.*, 2016].

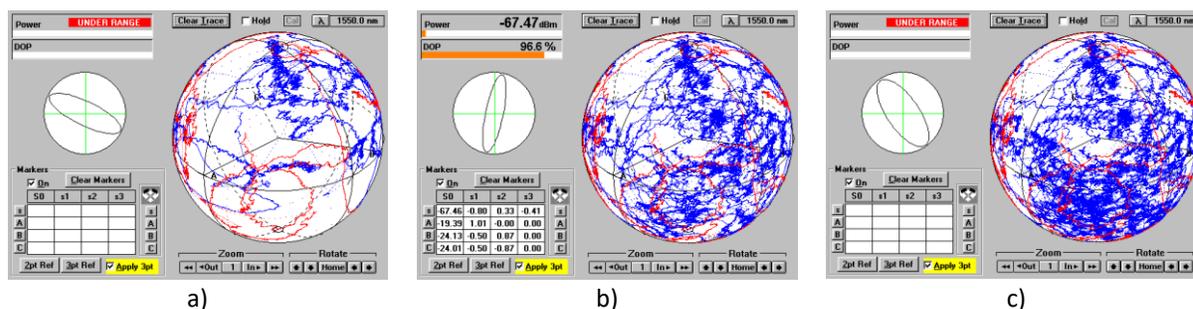


Figura 56 Impresiones de pantalla. a) Primer minuto de tener la lámpara cerca de la muestra. b) Captura a los 3 minutos. c) Impresión de pantalla a los 5 minutos de exponer el calor de la lámpara a la muestra.

4.4 Tercer fibra

Para la última muestra se utilizó una fibra de núcleo hueco de 10.3 cm de longitud, se le agregó un conector en una punta de la fibra y en el otro extremo se realizó únicamente un corte. Esta muestra se fabricó de la misma forma que la segunda fibra (Figura 50).

Se realizaron mediciones sintonizando el láser con las siguientes longitudes de onda; 1540 nm (M R), 1542 y 1544 nm; 1545 nm (M R), 1546 y 1548 nm; 1550 nm (M R), 1552 y 1554 nm; 1555 nm (M R), 1557 y 1559 nm; 1560 nm (M R), 1561, 1562, 1563, 1564 y 1565 nm. Se generó un marco de referencia en las longitudes de onda marcadas (M R). Todas las mediciones fueron graficadas con ayuda del programa Matlab y se descartaron los resultados que no mostraban una circunferencia estable.

4.4.1 Barrido azimutal a diferentes longitudes de onda

Al igual que con la primera y la segunda fibras, con este nuevo tramo de fibra se realizaron barridos azimutales del estado de polarización lineal de entrada a las longitudes de onda mencionadas anteriormente, siguiendo los mismos criterios al definir el marco de referencia. Los archivos seleccionados fueron normalizados y se muestran en la Figura 57.

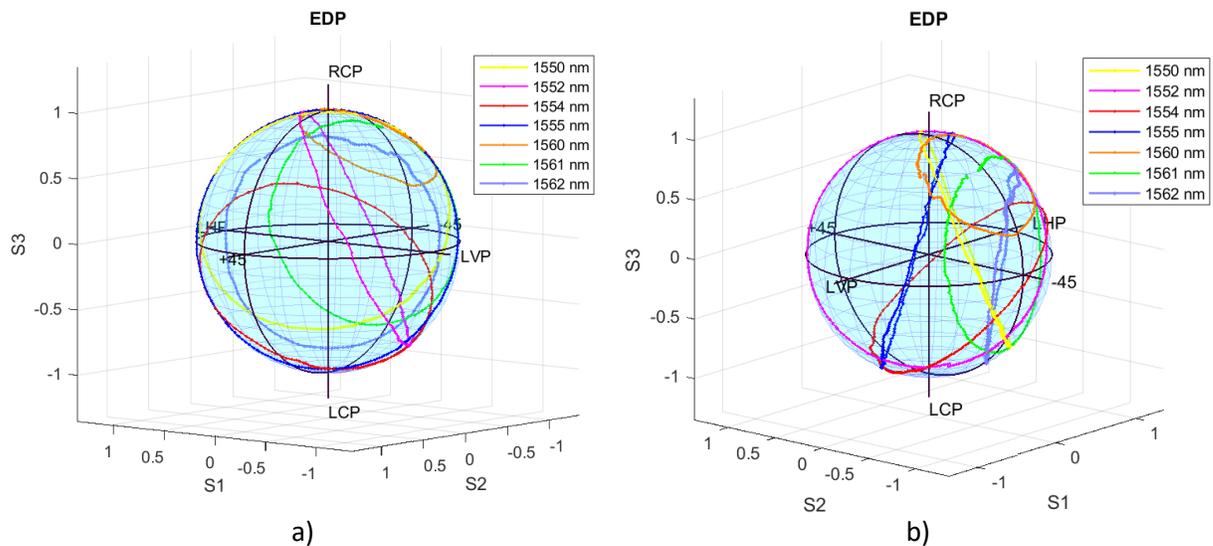


Figura 57 Resultados de barrido azimutal del SOP lineal de entrada para la tercera fibra. Se pueden observar circunferencias bien definidas con cambios en su orientación mucho más pronunciados. No se alcanza a percibir una tendencia dominante.

4.4.2 Diodo láser DFB como fuente de luz

Al igual que con las otras dos muestras, se reconfiguró el arreglo para el análisis de la birrefringencia como se muestra en la Figura 41 y se realizó una prueba rápida haciendo girar el polarizador de 0 a 180 grados. Esta prueba dio como resultado la circunferencia bien definida que se muestra en la Figura 58. Puede observarse que este círculo está ubicado en una posición muy cercana a la que se muestra en la Figura 57 para la traza de 1550 nm.

A continuación se rotó el polarizador sobre el mismo rango (0 a 180 grados). En esta ocasión se realizó la medición de los valores arrojados grado por grado, resultado que se muestra en la Figura 59.

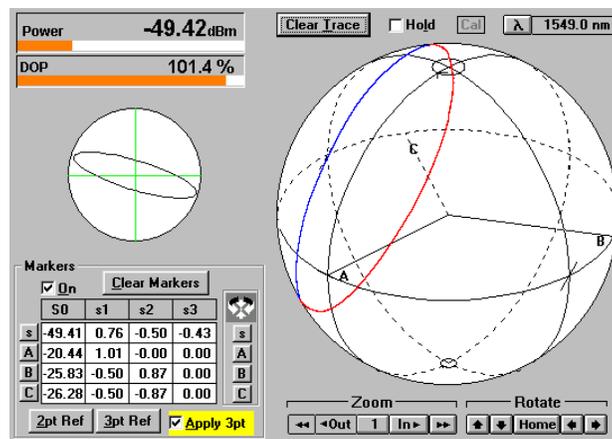


Figura 58 Para evaluar la birrefringencia de la tercer muestra de fibra, sin líquido infiltrado se realizó una prueba rápida (1549 nm), variando el ángulo azimutal del SOP lineal de entrada de 0° a 180° . La traza obtenida fue circular.

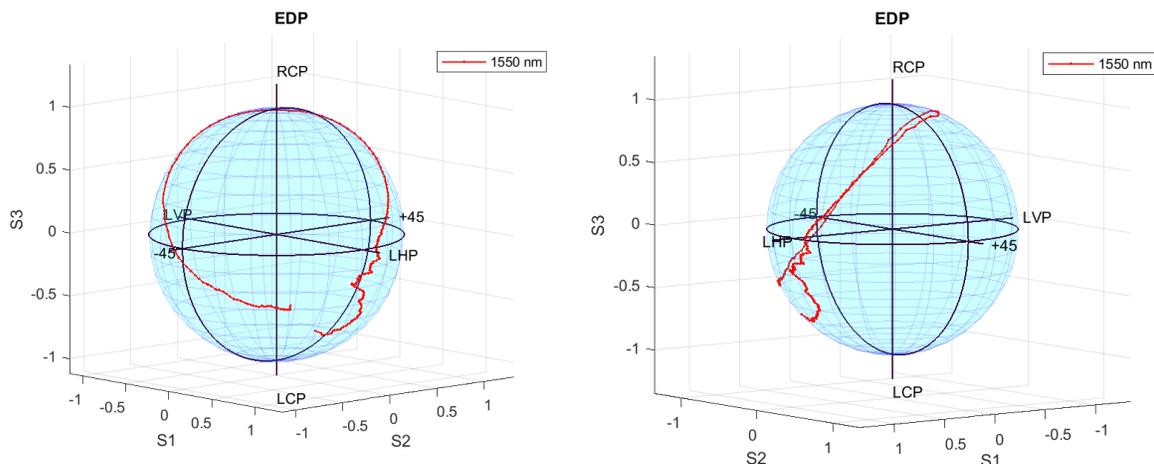


Figura 59 Evaluación del estado de polarización de salida usando un barrido azimutal del SOP lineal de la señal de entrada de 1549 nm. En este caso las inestabilidades ambientales produjeron discontinuidades observables al final de la traza.

En la Figura 59 se observa una traza similar a la de la Figura 58, aunque inestable al final del rango de medida. Se considera que este cambio al final de la trayectoria puede haber sido producido por cambios en la temperatura, la humedad y por las vibraciones generadas por el giro por pasos del polarizador.

4.4.3 Líquido quiral (R-, S-) Linalilo³

Una vez evaluada la respuesta de la muestra no infiltrada con líquido (usando una medida rápida y un barrido azimutal, ambos a 1549 nm), se permitió que por capilaridad, el líquido (R-, S-) Linalilo se infiltrara en el núcleo. Para ello se dio un tiempo de 24 horas.

Pasado el tiempo en que se infiltró el tercer líquido quiral (Linalilo levo-rotatorio) con ayuda del analizador de polarización se corroboró que se generó un núcleo líquido. Esto resultó evidente debido a la rápida variación del estado de polarización de la señal de salida con el tiempo, observada en la esfera de Poincaré.

Fue necesario realizar un corte a la fibra convencional del sistema de llenado de la muestra, debido a que dicha punta se contaminó con el Linalilo que se infiltró en el núcleo de la fibra fotónica.

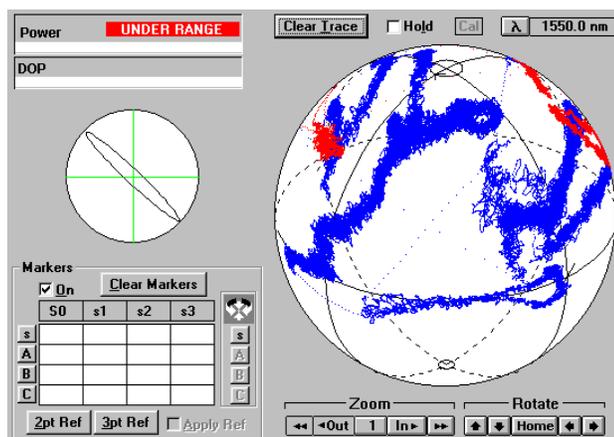


Figura 60 Medición continua durante 5 minutos.

³ A pesar de que está marcado como R, S- Linalilo, el fabricante indica que la muestra no es racémica; es levo-rotatoria.

Las primeras mediciones se realizaron usando la configuración de la Figura 60 que utiliza como fuente de luz un diodo láser DFB. En este caso fue necesario aumentar la corriente de alimentación del diodo hasta 50 mA, para lograr una salida estable. Sin embargo, ésta se deterioró rápidamente cuando el observador se movió (Fig. 60). Esto ocurría en presencia de cualquier perturbación física externa (aumento de temperatura, movimiento de la mesa, observador colocado cerca de la muestra).

La muestra se colocó en el arreglo de polarización con el diodo láser (Figura 41). Se generó el marco de referencia, pero debido a la baja potencia de salida no se obtuvo ningún resultado al agregar el prisma polarizador de calcita y hacerlo girar.

El único resultado que se pudo observar fue que al acercar una lámpara a la muestra y dejarla durante un minuto, el SOP de salida varió azarosamente como se muestra en la Figura 61.

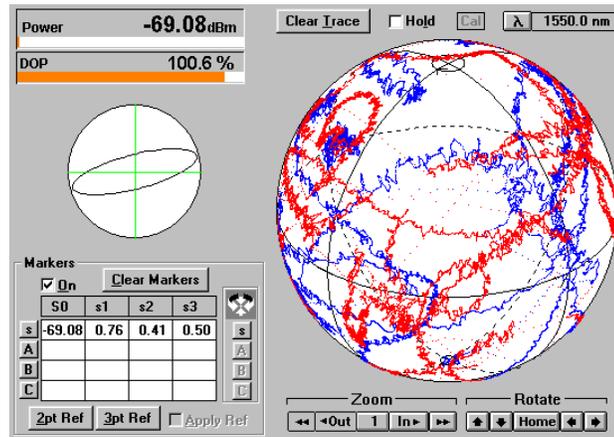


Figura 61 Resultado del estado de polarización caótico en respuesta a una perturbación física externa.

Se retiró la lámpara transcurrido el minuto y se reinició la medida del SOP de salida sobre la esfera de Poincaré (borrando los datos antes registrados). Se registró por un minuto la variación del estado de polarización Figura 62.

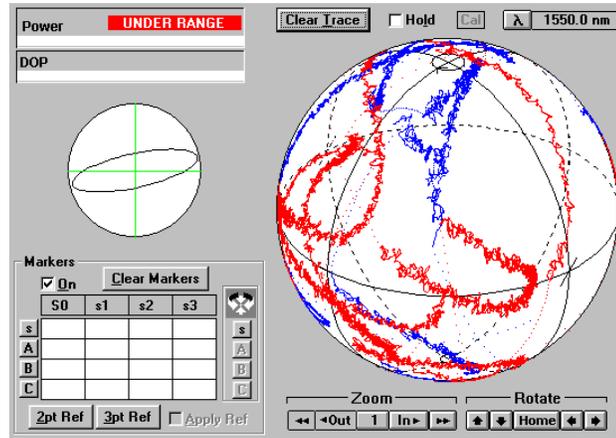


Figura 62 En este resultado se observa cómo el sistema empieza a estabilizarse.

El aviso UNDER RANGE que puede observarse en la Fig. 62, nos hace ver que en este caso la menor transmitancia del líquido infiltrado, impidió evaluar el cambio inducido en la birrefringencia de la muestra.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Discusión

El presente trabajo plantea como experimento evaluar la birrefringencia de la fibra de cristal fotónico de núcleo hueco por medio de la evolución del estado de polarización y posteriormente insertar líquidos quirales con la finalidad de observar su efecto sobre la birrefringencia.

Al trabajar con la fibra fotónica de núcleo hueco el problema a resolver consistió en infiltrar líquidos en su núcleo, mientras se encuentra alineada dentro de un arreglo polarimétrico. Para ello se presentaron diversas soluciones, basadas en diversos diseños de estructuras mecánicas.

Se presentó una propuesta en la que la fibra fotónica tendría conectores en los extremos y la luz se acoplaría a la fibra muestra usando una lente esférica. En este caso se planteó acoplar el haz de salida al arreglo polarimétrico a través de una segunda lente esférica. Para ello se aplicó epoxy en las caras de la fibra fotónica de núcleo hueco, con el fin de sellar la microestructura de la cubierta, sin contaminar su núcleo. El diseño opto-mecánico se realizó tomando en consideración tanto las dimensiones transversales de la férula del conector como las de las lentes esféricas que se utilizarían para acoplar el haz a la fibra y para desacoplarlo; así como las distancias focales de las lentes. En la etapa de implementación de este diseño fue necesario modelar en 3D los soportes requeridos con ayuda del programa SolidWorks, e imprimir en 3D las piezas que se modelaron.

En este diseño se usaron conectores en los extremos. El líquido se introdujo en las cavidades en que estaría expuesta la fibra fotónica, sellándolas por medio de una estructura elástica adosada a la pared de cada cavidad. Su elasticidad tenía como finalidad el facilitar la alineación de la fibra fotónica con la fuente de luz (fibra SMF-28e). Sin embargo, se tuvo que desechar este sistema debido a que lo opaco de las paredes, no permitió la alineación de la fibra.

Una alternativa propuesta fue la de infiltrar el líquido quiral usando agujas de jeringa. Las primeras pruebas se realizaron inyectando a mano el líquido. Al no tener resultados satisfactorios se intentó con dos tipos de microbombas de vacío. Posiblemente pudieran obtenerse mejores resultados usando esta técnica. Sin embargo, debido a que la microestructura de la fibra colapsó, se optó por usar un método de llenado más confiable para preservar la frágil estructura de la fibra de núcleo hueco.

El siguiente diseño fue un sistema construido con materiales transparentes y flexibles para la alineación de la fibra, usando el fenómeno de capilaridad para infiltrar el líquido. El sistema fabricado fue mucho más sencillo y se eliminó el uso de lentes esféricas. En su lugar se utilizó el método conocido como butt-coupling; el cual consiste en acercar lo más posible las puntas de las fibras, acoplando la luz proveniente de una de éstas (en este caso la fibra SMF-28e) a la otra (fotónica de núcleo hueco). Ambas fibras con los conectores ya mencionados. Las primeras pruebas con este sistema y este método dieron resultados adecuados, por lo que se decidió realizar el experimento usando esta opción.

Para poder añadir la fibra al arreglo experimental se fabricaron soportes impresos en 3D para los conectores de fibra de cada extremo. Estos fueron instalados sobre monturas de traslación XYZ, colocadas una frente a otra.

El arreglo experimental usa como fuente de luz un láser sintonizable. La fibra fotónica es introducida a este arreglo que permite la evaluación del cambio en el estado de polarización de salida, cuando rota el ángulo azimutal de entrada (debido al giro del prisma polarizador de calcita). Fue necesario realinear varias veces el arreglo, en especial la montura en la que está colocado el prisma pues el movimiento mecánico por pasos del prisma lo desajusta.

Los resultados que se analizan se obtuvieron con tres tramos de fibra de diferentes longitudes infiltradas con un líquido quiral distinto para cada una de las muestras. El primer tramo tiene una longitud de 11.7 cm con conectores para fibra óptica en ambos extremos de la fibra, y fue infiltrado licor de café (Kahlúa); en el segundo tramo de 10.2 cm con un conector en un extremo de la fibra, se usó Limonene (R+); por último, al tramo de 10.3 cm con un conector en un extremo de la fibra, se le infiltró Linalilo (R-, S-).

Los resultados del barrido espectral de la primera fibra y la tercera, muestran circunferencias descritas en la esfera de Poincaré algunas de las cuales corresponden a círculos mayores. Cabe mencionar, que aunque en la mayoría de los resultados obtenidos para la primer muestra las circunferencias descritas se encuentran orientadas hacia una misma región de la esfera, en un análisis lateral (girando la esfera de Poincaré) se observa que los planos que contienen a las circunferencias no son paralelos entre sí. Este resultado indica una contribución importante de la dispersión de la birrefringencia, ya que el eje de simetría de cada círculo interseca a la esfera de Poincaré en puntos distintos; i.e., los eigenmodos de polarización son diferentes para cada longitud de onda (Sección 2.2).

Para el segundo tramo de fibra, las circunferencias resultantes no pueden asociarse a una región visualmente definida de la esfera de Poincaré. Por tanto, al trazar una línea por el centro de la circunferencia, perpendicular a ella no existe coincidencia. En este caso la dispersión de la birrefringencia que se observa es mayor (Sección 2.2). Lo mismo ocurrió con la tercer muestra. Esto también puede deberse tanto a la falta de uniformidad de la fibra HC-PCF utilizada, como a los cambios ambientales que se presentaron al trabajar con la segunda y tercer muestras.

Para la primera muestra se pudo realizar una comparación entre los resultados medidos para la fibra con y sin el líquido. Dichos resultados dan pie a pensar que la presencia del licor de café, que es un líquido quiral dextro-rotatorio modificó la birrefringencia residual de la muestra, generando una fibra con una mayor componente de birrefringencia circular. Sin embargo, es necesario repetir este experimento controlando las condiciones ambientales, para validar este resultado.⁴

De la misma forma, en la prueba realizada con la fibra infiltrada con Limoneno se pudo apreciar un desplazamiento de la circunferencia hacia la derecha; lo que indica que se indujo una birrefringencia circular derecha. De nuevo, es necesario repetir este experimento controlando las condiciones ambientales, para validar este resultado.

Por último, en el trabajo experimental con el tercer núcleo quiral infiltrado con Linalilo no se obtuvieron resultados adecuados. Se considera que esto se debió a la baja transmitancia de este líquido.

5.2 Conclusiones

El objetivo general de esta tesis era llenar el núcleo hueco de una fibra de cristal fotónico para determinar experimentalmente los cambios inducidos en la birrefringencia de la fibra, lo cual se consiguió para los tres líquidos quirales usados en este trabajo.

Se construyó un sistema de llenado para una fibra de cristal fotónico de núcleo hueco (HC-PCF, hollow-core photonic crystal fiber). Y se integró este sistema en un arreglo polarimétrico con una fuente de luz

⁴ Durante este periodo hubo una fuerte “condición Santana” en la región, que produjo incendios en Tijuana, Rosarito y Ensenada.

sintonizable, lográndose evaluar la birrefringencia de las muestras vacías y observar los cambios inducidos al variar el contenido del núcleo de la fibra fotónica HC-PCF.

Se pretendía además verificar si los modelos de las matrices de birrefringencia de retardadores homogéneos permiten describir los resultados experimentales encontrados. Haciendo uso de los modelos teóricos presentados en el Capítulo 2 se concluyó que las trazas obtenidas para el barrido espectral (Figura 40) permiten determinar que la birrefringencia de la muestra 1 vacía corresponde a la de un retardador elíptico, con una longitud de batimiento de 0.0554 m. Además, los valores obtenidos para la ubicación de sus eigenmodos de polarización a 1542 y 1560 nm indican que la dispersión de su birrefringencia es alta, comparada con la de las fibras monomodo convencionales. En el caso de las muestras 2 y 3 vacías, las condiciones ambientales impidieron determinar la ubicación de los eigenmodos asociados a alguna de las longitudes de onda de trabajo.

Los cambios medidos, a diferentes longitudes de onda, para el estado de polarización de salida de los líquidos quirales dextro-rotatorios muestran que dicha actividad óptica es dominante para la longitud de onda de 1550 nm al infiltrar la fibra con licor de café o con Limoneno. Sin embargo, debido a la birrefringencia residual elíptica de la muestra sin líquido, es posible que la birrefringencia total sea elíptica. Esto no fue posible verificarlo ya que las perturbaciones ambientales⁵ no permitieron la colección de datos requerida para aplicar el método de barrido espectral, que valida el uso de la técnica monocromática expuesta en la Sección 2.4.2.

Los resultados presentados dan pie a trabajos futuros, en los que se tenga un mejor control de las variables que afectan las mediciones consideradas en este trabajo.

⁵ En particular, se sabe que la temperatura tiene un efecto un orden de magnitud mayor para los líquidos, que para el vidrio de sílice.

Literatura citada

- Bueno García, J. M., (1999), Estudio de las propiedades de polarización del ojo humano. Tesis Doctorado , Facultad de Química, Universidad de Murcia.
- Chartier T., Hideu A., Özkul C., Sanchez F., Stéphan G. M., (2001), Measurement of the elliptical birefringence of single-mode optical fibers, *Appl. Opt.* **40**. 5343-5353.
- Collantes Pablo, G., (2016), Estudio de fibras de cristal fotónico para biosensado haciendo uso de interrogación transversal, Tesis Licenciatura, Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales, Valencia, España.
- Cox F.M., A. Argyros, and Large M. C. J., (2006), Liquid-filled hollow core microstructured polymer optical fiber, *Opt. Express* **14**, 4135-4141.
- Danyun Fan, Zhiqiang Jin, Guanghui Wang, Fei Xu, Yanqing Lu, Hu Dora Juan Juan, Wei Lei, Shum Ping, Zhang Xuping, (2017), Extremely High-Efficiency coupling Method for Hollow-Core Photonic Crystal Fiber, *IEEE Photonics Journal*, **9**(3): 7104108: doi: 10.1109/JPHOT.2017.2697969.
- Estrada Barrios Isaac, (2014), Caracterización experimental de la polarización de luz en fibras ópticas, Tesis de ingeniero en telecomunicaciones, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Gil, P. M. A., & Pérez, J. G. (1991). El modelo de la esfera de Poincaré: representación de medios materiales. *Zubía*, (9), 9-17.
- González R Luz Esther, (2013), Estudio de cristales fotónicos basados en ferrofluidos con nanopartículas magnéticas de ferritas de cobalto-zinc, Tesis Maestría, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Gutiérrez García J. C., (2008), Análisis de polarización de la interacción luz-materia en medios anisotrópicos, Tesis de maestría en ciencias, Centro de Investigaciones en Óptica, León, Guanajuato.
- Huang Yanyi, Xu Yong, Yariv Amnon, (2004), Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5182.
- Knight J. C., Birks T. A., Russell P. St. J., and D. M. Atkin, (1996), All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding, *Opt. Lett.* **21**, 1547-1549.

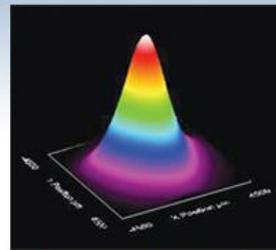
- Morales Villagómez Luis Mario, (2016). Estudio de las Nanopartículas de Ferrita MnZn ($Mn_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$) Infiltradas en Fibra de Cristal Fotónico de Núcleo Hueco Para Detección de Campo Magnético, Tesis Maestría, División de Ciencias e Ingenierías campus Salamanca-Irapuato, Salamanca, Guanajuato.
- Mynbaev D., Scheiner.v L., (2001), Fiber-Optic Communications Technology, Prentice Hall.
- Nielsen K., Noordegraaf D., Sørensen T., Bjarklev A., and Hansen T. P., (2005), Selective filling of photonic crystal fibres. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, volume 7.
- Olson, James D.; Horne, Frederick H., (1973), Direct determination of temperature dependence of refractive index of liquids, *The Journal of Chemical Physics*, Volume 58 (6), p.2321-2325.
- Rojas Sánchez Adriana, Dra. Tentori, Dr. Alfonso García Weidner, (2019) Birefringence characterization of single-mode optical fibers, *Proceedings RIAO-OPTILAS-MOPM 2019*, 88-89.
- Smolka Stephan, Barth Michael, and Benson Oliver, (2007), Highly efficient fluorescence sensing with hollow core photonic crystal fibers, *Opt. Express* **15**, 12783-12791.
- Tentori Diana, C. Ayala-Díaz, F. Treviño-Martínez, F.J. Mendieta-Jiménez, (2007), Evaluation of the residual birefringence of single-mode erbium-doped silica fibers, *Optics Communications* **271**, 73-80.
- Tentori Santa Cruz Diana, César Ayala Díaz, Fernando Treviño Martínez, Miguel De Jesus Farfan Sanchez, Francisco Javier Mendieta Jimenez, (2004), Birefringence evaluation of erbium doped optical fibers, *Proc. SPIE Proc. SPIE* **5531**, 359-366.
- Tentori, A. García-Weidner y Jorge Arturo Rodríguez García (2016). Use of fiber helical coils to obtain polarization insensitive fiber devices. *Optical Fiber Technology*. **31**(1) 13-19.
- Treviño Martínez F., Tentori D., Ayala Díaz C., Mendieta Jiménez F.J., (2005), Birrefringence assessment of single-mode optical fibers, *Opt. Express* **13**, p. 2556.
- Waxler Roy M.; Cleek G. W., (1973), The Effect of Temperature and Pressure on the Refractive Index of Some Oxide Glasses, *Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry* Vol. 77A, No. 6, 1973.

Anexo 1

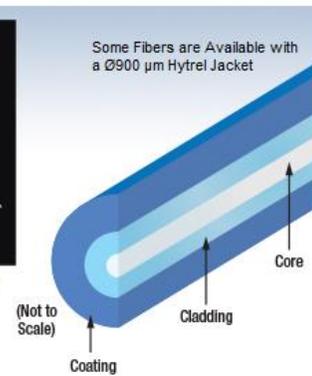
Corning SMF-28E Optica Fiber, (2005),



- ▶ Operating Wavelengths from 320 nm to 2.3 μm
- ▶ Shipped from Stock with No Minimum Order
- ▶ Patch Cables Available for All Fibers
- ▶ $\varnothing 80 \mu\text{m}$ or $\varnothing 125 \mu\text{m}$ Cladding Available



Typical Output Beam Profile from a Single Mode Fiber



Single Mode Fiber Cross Section

Anexo 2

HC-1550-02, Hollow Core Photonic Bandgap Fiber,



Crystal Fibre • *aeroLASE* • Koheras • SuperK

HC-1550-02

Hollow Core Photonic Bandgap Fiber

- < 5% of optical power located in silica
- Gaussian-like fundamental mode
- Can be filled with gas
- Negligible bend loss
- Fresnel reflection of core mode to air $\lt; 10^{-4}$
- Mode effective index close to unity
- Numerical Aperture ~ 0.2
- Pure silica for good temperature stability

Hollow core Photonic Bandgap Fibers guide light in a hollow core, surrounded by a microstructured cladding of air holes and silica.

Since only a small fraction of the light propagates in silica, the effect of material nonlinearities is insignificant and the fibers do not suffer from the same limitations on loss as conventional fibers made from solid material alone.

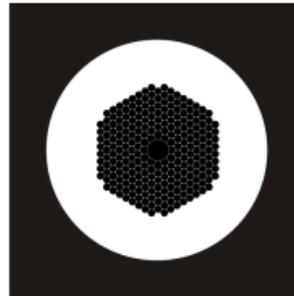
Applications

- Fiber optic gyroscopes
- Pulsed lasers (pulse delivery and/or compression)
- Gas spectroscopy
- Low latency communication

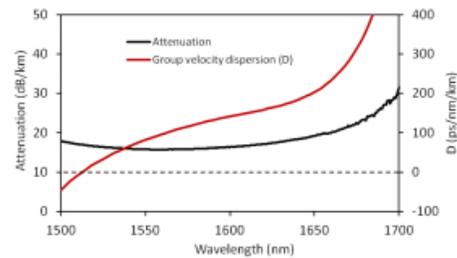
Physical properties	
Core diameter	$10 \pm 1 \mu\text{m}$
Cladding pitch	$3.8 \pm 0.1 \mu\text{m}$
Diameter of PCF region	$70 \pm 5 \mu\text{m}$
Cladding diameter	$120 \pm 2 \mu\text{m}$
Coating diameter	$220 \pm 30 \mu\text{m}$
Coating material	Single layer acrylate
Optical properties	
Design wavelength	1550 nm
Attenuation @ 1550 nm	$\lt; 30 \text{ dB/km}$
Typical GVD @ 1550 nm	90 ps/nm/km
Operating wavelength ⁽¹⁾	1490-1680 nm
Mode field diameter @ 1550 nm ⁽²⁾	$9 \pm 1 \mu\text{m}$

1. Over which the attenuation is $\lt; 30 \text{ dB/km}$
2. Full $1/e^2$ -width of the near field intensity distribution

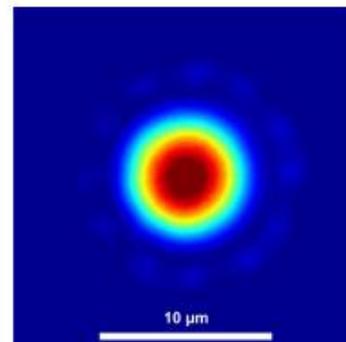
Schematic fiber cross section



Typical attenuation and dispersion



Typical near field Intensity profile



HC-1550-02-111221