



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Caracterización y control del estado de
polarización de la luz en un interferómetro de
SAGNAC**

**TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERÍA EN REDES**

PRESENTA
Carlos Alfredo Juárez Cruz

DIRECTOR DE TESIS
Dr. Homero Toral Cruz

ASESORES PROPIETARIOS
Dr. Francisco Méndez Martínez
Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

ASESORES SUPLENTE
Dr. José Antonio León Borges
M.M. José Raúl García Segura





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO
"Caracterización y control del estado de polarización de la luz en un interferómetro de SAGNAC"


ELABORADO POR
Carlos Alfredo Juárez Cruz

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:

INGENIERÍA EN REDES

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:




Dr. Homero Toral Cruz

ASESOR:



Dr. Francisco Méndez Martínez

ASESOR:



Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

SUPLENTE:



Dr. José Antonio León Borges

SUPLENTE:



M.M. José Raúl García Segura



UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO

AREA DE TITULACION



Agradecimientos

Primeramente, a Dios, por concederme la fuerza necesaria para no rendirme en las tantas veces que flaqueo.

A mi familia, mi madre que luchó todos los días por apoyarme para lograr esta meta, por soportar tantas noches de desvelos y trabajos arduos. Mi hermano Luis +, que creyó en mí ciegamente desde la obscuridad de su corazón, mi hermana que siempre me dio ánimos. Mi sobrina, quien sigue mis pasos lentamente y sin saberlo me inspira a cumplir las metas. Este logro, es de todos.

A todas aquellas personas que participaron en mi crecimiento y en camino hacia esta primera meta. Desde que llegué a la casa del campesino, hasta llegar a la universidad.

Gracias Doña Mercy Venegas, Doña Laurita y Laura, Maestra Nidia Mimenza, Maestra Linda Garrido, Papá Daniel y Mamá Vilesmi, Yaritza. Gracias por darme la mano cuando más lo necesité.

Gracias Idania, Omar, Araceli y Deysi, por ese gran impulso y ayudarme siempre, en las buenas y las malas.

Finalmente agradezco a mis profesores, que con sus conocimientos y ayuda estoy por terminar. Gracias Dr. Homero, Dr. Jaime, Dr. Javier, Profe Rubén, Profe Raúl García. Y gracias, maestra Melissa B. por todo el apoyo y por no dejarme reprobar.

Dedicatoria

A mi hermano Luis, dónde quieras que estés. ¡Lo logré ;

Resumen

La comunicación entre los seres vivos es sumamente necesaria e importante, para transmitir, intercambiar o compartir información. Actualmente las telecomunicaciones lo conforman todos los sistemas, equipos y métodos que facilitan la transmisión de información, por lo general por medios y dispositivos electrónicos.

La idea de transmitir información por medio de luz es muy antigua, pero poco a poco con el paso del tiempo esa idea ha ido cambiando, “hacia 1880, Bell construyó un aparato conocido como el fonógrafo que enviaba señales vocales a corta distancia por medio de la luz”.

La fibra óptica surgió como medio para transmitir información a través de luz, gracias al surgimiento de nuevas tecnologías y la necesidad de tener que transmitir grandes cantidades de datos a mayores velocidades, desde que surgió la fibra óptica tuvo gran auge debido a su gran capacidad de ancho de banda, inmunidad a la interferencia inductiva o eléctrica entre otras ventajas.

Durante los últimos años la fibra óptica ha ido cambiando el mundo de las comunicaciones, de tal manera que se ha visto reflejado en el aumento de la capacidad para transmitir gran cantidad de información a través de largas distancias. El objetivo principal es reemplazar el cable tradicional de cobre por filamentos de vidrio que transportan impulsos de luz.

Las características de los elementos que forman el sistema de fibras ópticas no solamente han alcanzado valores óptimos de rendimiento propuestos por laboratorios de investigación, sino que son capaces de satisfacer exigentes requisitos físicos y de confiabilidad para aplicaciones que soporten el crecimiento de las telecomunicaciones.

Las fibras ópticas han demostrado ser uno de los medios de transmisión más eficientes en los sistemas de comunicaciones; sin embargo, este medio de comunicación tiene también ciertas ventajas y desventajas, ya que, al ser portador de mayor cantidad de información con una rapidez mayor a los materiales utilizados convencionalmente, sufre de igual forma efectos ópticos, tal como la dispersión.

Una vez que la demanda en la capacidad de transmisión aumenta, los proveedores de servicios de internet (ISP) se ven obligados a actualizar su estructura de red periódicamente para poder admitir velocidades de transmisión más altas. Sin embargo, para poder realizar esta actualización es necesario verificar que la infraestructura de fibra desplegada cumpla con ciertos requisitos de rendimiento y fiabilidad. Existen tres parámetros importantes que hay que tener en cuenta para

dichas actualizaciones: la dispersión cromática, la dispersión del modo de polarización (PMD) y la atenuación de la fibra. Existen ciertos dispositivos que son sensibles a la polarización, por tal motivo es de gran importancia caracterizar y tener el control del efecto óptico PMD.

Contenido

Agradecimientos.....	3
Dedicatoria	4
Resumen	5
Contenido	7
CAPÍTULO 1. Introducción	12
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Antecedentes	15
1.3 Objetivo general	17
1.4 Objetivos específicos	17
CAPÍTULO 2. Principios teóricos	19
2.1 Historia de las fibras ópticas	19
2.2 Las fibras ópticas	19
2.3 Tipos de fibra óptica	20
2.3.1 Monomodo	21
2.3.2 Multimodo.....	21
2.3.2.1 Índice escalonado	22
2.3.2.2 índice gradual.....	22
2.4 Tipos de atenuaciones o pérdidas que se presentan en la fibra óptica	23
2.4.1 Atenuación	23
2.4.2 Atenuación por curvaturas	24
2.4.3 Pérdidas por empalme	24
2.4.4 Perdidas por absorción	25
2.4.5 Dispersión	25
CAPÍTULO 3 Fenómenos de la polarización en las fibras ópticas	27
3.1 Polarización de la luz en la fibra óptica	27
3.1.1 Lineal.....	28
3.1.2 Circular	29
3.1.3 Elíptica	30
3.2 Placas retardadoras y polarizadoras	31

3.2.1 Polarizador	31
Si por un polarizador lineal incide luz linealmente polarizada, la intensidad transmitida resulta.....	32
3.2.2 Placa retardadora.....	32
3.3 Interferómetro de SAGNAC.....	34
3.4 Parámetros de Stokes.....	35
CAPÍTULO 4 Configuración experimental.....	41
4.1 Diagrama experimental.....	41
4.2 Determinación y control del estado de polarización a la salida de un láser	44
4.3 Implementación y caracterización de una placa $\lambda/4$	49
4.4 Implementación del interferómetro de Sagnac.....	53
CAPÍTULO 5. Resultados.....	58
5.1 Determinación del estado de polarización en cada uno de los componentes del interferómetro de Sagnac.....	58
CAPÍTULO 6. Conclusiones.....	66
Bibliografía	67

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.....	23
Ecuación 2.....	32
Ecuación 3.....	33
Ecuación 4.....	36
Ecuación 5.....	36
Ecuación 6.....	36
Ecuación 7.....	37
Ecuación 8.....	37
Ecuación 9.....	37
Ecuación 10.....	38
Ecuación 11.....	38
Ecuación 12.....	38
Ecuación 13.....	38
Ecuación 14.....	38
Ecuación 15.....	38

Ecuación 16.....	39
Ecuación 17.....	39
Ecuación 18.....	46
Ecuación 19.....	49
Ecuación 20.....	49
Ecuación 21.....	50
Ecuación 22.....	50

Índice de figuras

Figura 1. Periodo de repetición de los estados de polarización	14
Figura 2. Estructura de la fibra óptica.....	20
Figura 3. Propagación de luz en fibra monomodo.....	21
Figura 4. Propagación de luz en fibra multimodo	22
Figura 5. Multimodo de índice escalonado	22
Figura 6. Multimodo de índice gradual	23
Figura 7. Pérdida por curvatura.....	24
Figura 8. Pérdida por fusión	25
Figura 9. Campos vectoriales: eléctrico y magnético de una onda transversal viajando en la	27
Figura 10. Polarización lineal	28
Figura 11. Luz linealmente polarizada.....	28
Figura 12. Luz polarizada circularmente hacia la izquierda.....	29
Figura 13. Polarización circular	30
Figura 14. Propagación de polarización de la luz.....	30
Figura 15. Polarización elíptica	31
Figura 16. Polarizador lineal.....	32
Figura 17. Placa retardadora.....	33
Figura 18. Interferómetro de Sagnac.....	34
Figura 19. Diagrama experimental	41
Figura 20. Controlador manual de polarización de tres paletas	42
Figura 21. Interferómetro de Sagnac (acoplador).....	42
Figura 22. Bandeja	43
Figura 23. Diagrama experimental	44
Figura 24. Implementación del diagrama en el laboratorio de la UNACAR.....	44
Figura 25. Diagrama experimental del láser.....	46
Figura 26. Esquema del funcionamiento del interferómetro de Sagnac.....	53
Figura 27. Esquema de trayectoria que recorre la luz.....	54

Figura 28. Conexión del aislador óptico y la lambda 1	55
Figura 29. Control de polarización en el lazo de Sagnac	55
Figura 30. Lectura de la onda de salida del interferómetro de Sagnac	56
Figura 31. Láser de luz natural.....	59
Figura 32. Prueba con láser de luz natural.....	60
Figura 33. Luz no polarizada	60
Figura 34. Implementación con el Controlador Manual de Polarización.....	62

Indice de tablas

Tabla 1. Estados emergentes de una lámina de $\lambda/4$	34
Tabla 2. Pérdidas estimadas por empalme	43
Tabla 3. Pruebas del láser	45
Tabla 4. Valores obtenidos del láser, $\frac{1}{2}$	47
Tabla 5. Valores obtenidos del láser, parte $2/2$	48
Tabla 6. Error estimado para 1 bucle	50
Tabla 7. Error estimado para 2 bucles	51
Tabla 8. Error estimado para 3 bucles	51
Tabla 9. Error estimado para 4 bucle	51
Tabla 10. Error estimado para 5 bucles	52
Tabla 11. Error estimado para 6 bucles	52
Tabla 12. Error estimado para 7 bucles	52
Tabla 13. Error estimado para 8 bucles	52
Tabla 14. Resultados de la matriz de Stokes	59

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1. Introducción

Durante los últimos años la fibra óptica ha ido cambiando el mundo de las comunicaciones, de tal manera que se ha visto reflejado en el aumento de la capacidad para transmitir gran cantidad de información a través de largas distancias. El objetivo principal es remplazar el cable tradicional de cobre por filamentos de vidrio que transportan impulsos de luz.

Una vez que la demanda en la capacidad de transmisión aumenta, los proveedores de servicios de internet (ISP) se ven obligados a actualizar su estructura de red periódicamente para poder admitir velocidades de transmisión más altas. Sin embargo, para poder realizar esta actualización es necesario verificar que la infraestructura de fibra desplegada cumpla con ciertos requisitos de rendimiento y fiabilidad. Existen tres parámetros importantes que hay que tener en cuenta para dichas actualizaciones: la dispersión cromática, la dispersión del modo de polarización (PMD) y la atenuación de la fibra, pero para ciertos dispositivos que son sensibles a la polarización se debe tener en cuenta el estado de polarización.

1.1 Planteamiento del problema

El uso de fibras ópticas como medio de comunicación tiene sus ventajas, así como sus desventajas; estas son portadoras de una gran cantidad de información a gran velocidad, a diferencia de los materiales que son usados en los medios de transmisión convencional, la fibra sufre diferentes efectos ópticos durante la transmisión.

Uno de estos efectos que se presentan en la transmisión de información a través de la fibra óptica es la polarización de la luz que se propaga en la fibra.

Normalmente en muchos trabajos de fibra óptica no se toma en cuenta el estado de polarización de la luz, generalmente en los trabajos que se utiliza fibra de baja birrefringencia, debido a que este tipo de fibras cuando se ingresa una luz polarizada esta pasa por todos los estados de polarización, que es otro de los parámetros conocido como la longitud de repetición L_B , en la que el estado de polarización es repetido periódicamente y se representa por: $L_B = \lambda/B$. Donde beta es la birrefringencia de la fibra dado por la ecuación $B = |n_x - n_y| = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{2\pi/\lambda_0}$, donde β_x y β_y son las constantes de propagación de fase de los dos modos de polarización y λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

En la Figura 1, se muestra el periodo de repetición, donde la fibra pasa por todos los estados de polarización.

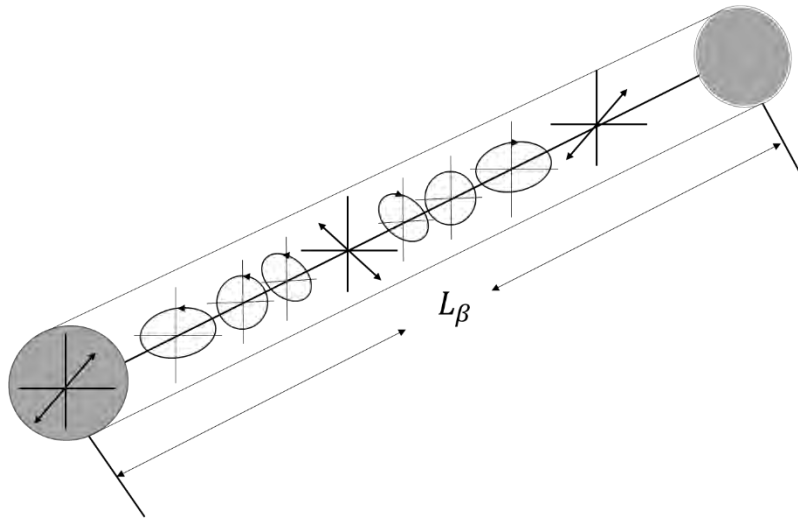


Figura 1. Periodo de repetición de los estados de polarización

Debido a esta propiedad de la $L_B = \lambda/B$ y dependiendo en que tramo se corte la fibra será el estado de polarización que se tenga. Por tanto, cuando se tenga que utilizar el interferómetro de Sagnac de fibra óptica para ciertas aplicaciones como conmutador óptico o eliminación de pedestal de un tren de pulsos ópticos se tiene la necesidad de caracterizar y manipular la polarización de la luz.

En el presente trabajo se caracterizará el estado de polarización en los componentes de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica, desde la salida del láser pasando por el aislador óptico y por una placa retardadora de $\lambda / 4$ para generar la asimetría en polarización, así como en el puerto 2 utilizado como la salida del interferómetro.

Por otro lado, existe otro factor muy importante llamado birrefringencia el cual puede ser causado por imperfecciones en la geometría del núcleo de la fibra o revestimiento. Este factor generalmente ocurre en el proceso de fabricación de la fibra, pero también por torsión o doblado del cable.

1.2 Antecedentes

La comunicación entre los seres humanos es importante y necesaria para transmitir y compartir información. Con el paso de los años, la comunicación ha evolucionado, de manera que se han empleado diferentes formas para poder compartir y transmitir información entre un individuo y otro.

Actualmente las telecomunicaciones lo conforman todos los sistemas, equipos y métodos que facilitan la transmisión de información, por lo general por medios y dispositivos electrónicos.

La idea de transmitir información por medio de luz es muy antigua, pero poco a poco con el paso del tiempo esa idea ha ido cambiando, “hacia 1880, Bell construyó un aparato conocido como el fotófono que enviaba señales vocales a corta distancia por medio de la luz”. (1).

En los últimos años los sistemas de comunicaciones han ido mejorando. La fibra óptica surgió como medio para transmitir información a través de luz, gracias al surgimiento de nuevas tecnologías y la necesidad de tener que transmitir grandes cantidades de datos a mayores velocidades, desde que surgió la fibra óptica tuvo gran auge debido a su gran capacidad de ancho de banda, inmunidad a la interferencia inductiva o eléctrica entre otras ventajas.

Existen algunos trabajos relacionados al estudio realizado en el presente proyecto, estos se mencionan a continuación:

- **Estudio de polarización vectorial**, por el Lic. Néstor Eduardo Cruz Ojeda del *INAOE*, donde expone el estado de polarización de la luz a través de la fibra óptica mediante la construcción de un polarímetro de Stokes.
- **Aplicaciones del Interferómetro de Sagnac de Fibra en Tecnología de Telecomunicaciones y para la Generación de Pulsos Ópticos Ultracortos**, por Andrés González García del *C/O*. Donde expone un análisis experimental de un filtro propuesto con la configuración del interferómetro de Sagnac en régimen continuo.

- **Medición de la polarización de la luz**, por Neil C. Bruce y Juan Manuel López Téllez, del *CCADET* y *UNAM* respectivamente. Quiénes mencionan los tipos de polarización en la luz.

1.3 Objetivo general

Caracterizar y controlar el estado de polarización de la luz en los componentes del interferómetro de Sagnac mediante los parámetros de Stokes.

1.4 Objetivos específicos

- Determinar y controlar el estado de polarización a la salida de un láser con pigtail.
- Implementar y caracterizar una placa retardadora $\lambda/4$.
- Implementar el interferómetro de Sagnac con fibra de baja birrefringencia y placa retardadora $\lambda/4$ en uno de los brazos, para generar asimetría en polarización.
- Determinar el estado de polarización de cada uno de los componentes del interferómetro de Sagnac.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. Principios teóricos

2.1 Historia de las fibras ópticas

Durante los años de 1800 iniciaron las comunicaciones eléctricas, una de estas fue el código Morse, el cual permitió la comunicación en largas distancias. Sin embargo, más a delante, durante el año 1876, se inventó el teléfono, dispositivo mediante el cual las señales eléctricas tuvieron una mayor importancia. Debido a que este funcionaba de manera analógica con una corriente eléctrica que estaba variando continuamente (2). Al principio el servicio telefónico utiliza pares de cables, posteriormente evolucionó a cables coaxial que le permitieron la mayor transmisión de información.

Durante la década de los 50 y 60 se creó el primer láser, y se demostró su funcionamiento como dispositivo óptico. Algunos autores toman este acontecimiento como el principio de las fibras óptica. Es entonces que surge la necesidad de un medio transportador para el láser y finalmente que pueda transportar información. Según Agrawal las primeras fibras ópticas de vidrio se fabricaron en 1920, sin embargo, no es hasta 1966 que fueron utilizados para las comunicaciones. El problema de estas primeras fibras ópticas eran las atenuaciones que se presentaban, las primeras pérdidas registradas eran de 1000 dB/km, lo cual era muy alto. Durante el avance de las investigaciones en la década de los 70 las pérdidas fueron disminuyendo hasta 20 dB/km, utilizando aproximadamente longitudes de onda de $1\mu\text{m}$ y cambiando el material de la fibra de vidrio a silicio. Fue hasta el año 1979 que se logró una aproximación en la longitud de onda de $1.55\mu\text{m}$ gracias al avance en la fabricación de las fibras de silicio haciendo así una disminución a la pérdida de menos de 0.2 dB/km (2).

2.2 Las fibras ópticas

Las fibras ópticas propagan la luz por el principio de reflexión interna total, la luz puede transmitirse reflejarse o refractarse, según el medio (agua, vidrio, plástico, etc.). Cuando un rayo de luz se transmite de un lado a otro, dicha luz es afectada por ambos medios entrada-salida, debido a que su velocidad varia al cruzar de un medio a otro. Cada medio se define en términos de su índice de refracción, que da resultado a la comparación de la velocidad de la luz incidente a la velocidad de la luz en el vacío.

Existen tres acciones que pueden suceder cuando un rayo de luz cambia de medio, y cada acción depende del ángulo de incidencia del rayo de luz cuando incide en el medio. (3)

1. Si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico, el rayo de luz se refractará saliendo del núcleo.
2. Si el ángulo de incidencia es exactamente igual al ángulo crítico, el rayo de luz viajará a lo largo de la unión de la superficie de los dos medios.
3. Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, el rayo será reflejado.

2.3 Tipos de fibra óptica

Existen dos tipos de fibra, monomodo y multimodo. La diferencia entre ellos es la forma de propagación de la luz en ella.

La fibra óptica opera como una guía, ya que lleva la luz introducida de un extremo al otro. La Fuente de luz puede ser tanto un diodo como un láser. La luz es enviada a través del cable de manera intermitente, y al otro extremo un receptor sensible a la luz convierte los pulsos de luz en uno y ceros digitales de señal original. Cabe mencionar que no siempre será digital.

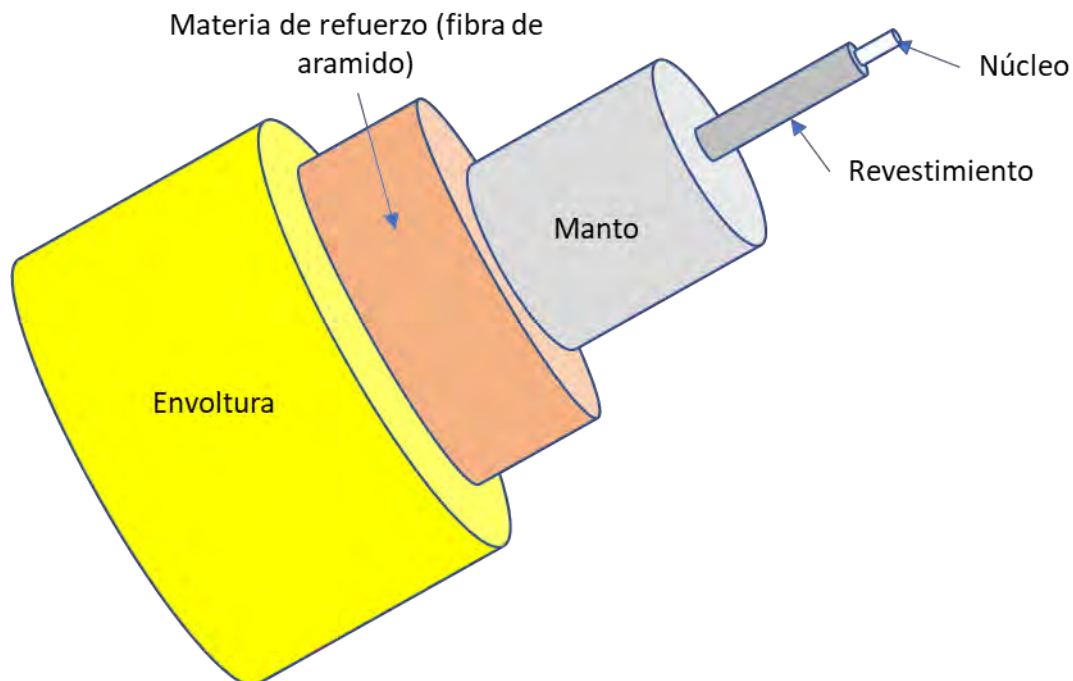


Figura 2. Estructura de la fibra óptica

2.3.1 Monomodo

Este tipo de fibras tienen un solo modo de propagación ya que su núcleo es muy estrecho, lo que le permite que la luz viaje a lo largo del núcleo evitando la dispersión modal. (3)

La atenuación de estas fibras se encuentra entre 0.1 dB/km (decibeles por kilómetro) y 0.4 dB/km, comúnmente el diámetro de su núcleo mide entre 8 y 10 μm , lo que causa que un haz de luz se propague siguiendo una trayectoria paralela a su eje, como se muestra en la Figura 3.

El alto ancho de banda que tiene este tipo de fibras aunado a su baja atenuación y su dispersión modal hace que sea una fibra idónea para enlaces de larga distancia. No obstante, requiere de una minuciosa instalación y mantenimiento ya que su minúsculo diámetro da lugar a un cono de aceptación sustancialmente menor que el de las fibras multimodo. (4)

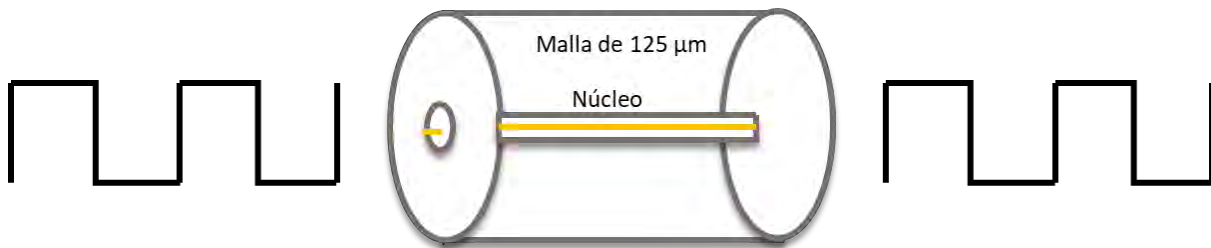


Figura 3. Propagación de luz en fibra monomodo

2.3.2 Multimodo

La fibra multimodo, es aquella cuyo diámetro de su núcleo es lo suficientemente amplio para propagar varios modos de transmisión simultáneamente. Estas fibras poseen una atenuación entre 0.3 y 1 dB/km y el núcleo mide entre 60 y 62.5 μm .

Este tipo de fibras pueden ser de índice escalonado o índice gradual, a continuación, se explican cada uno de estas.

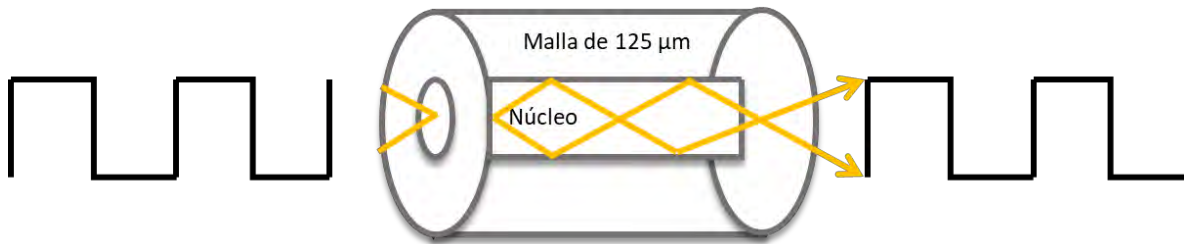


Figura 4. Propagación de luz en fibra multimodo

2.3.2.1 Índice escalonado

Es una fibra que está conformado por un índice de refracción uniforme rodeado de un revestimiento. Para la fibra multimodo de índice escalonado, la luz se propaga en forma de zigzag como se muestra en la Figura 5, a lo largo del eje de la fibra. La luz que es ingresada a la fibra en diferentes ángulos de incidencia cruzará por diferentes caminos. Los haces de luz incidentes se propagan a la misma velocidad de manera simultánea en la entrada, sin embargo, el tiempo para alcanzar la salida es diferente. Esto resulta una dispersión temporal llamada, dispersión modal.

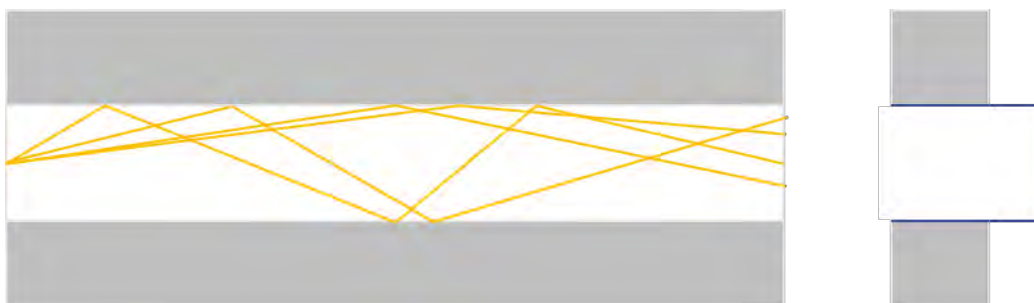


Figura 5. Multimodo de índice escalonado

2.3.2.2 índice gradual

Este tipo de fibra tiene un índice de refracción en el interior del núcleo que disminuye conforme se desplaza del núcleo hacia la cubierta. Esto, provoca refracción en lugar de reflexión interna total. Estos tipos de fibras reducen la dispersión entre los diferentes modos de propagación a través de su núcleo.

En estas fibras la luz viaja a través del núcleo en forma de oscilación sinusoidal. El núcleo está formado por varias capas concéntricas con diferentes índices de

refracción lo que causa que el haz de luz cambie de dirección poco a poco mientras viaja por el núcleo, lo que hace verse como si la luz inducida se curve como se muestra en la Figura 6.

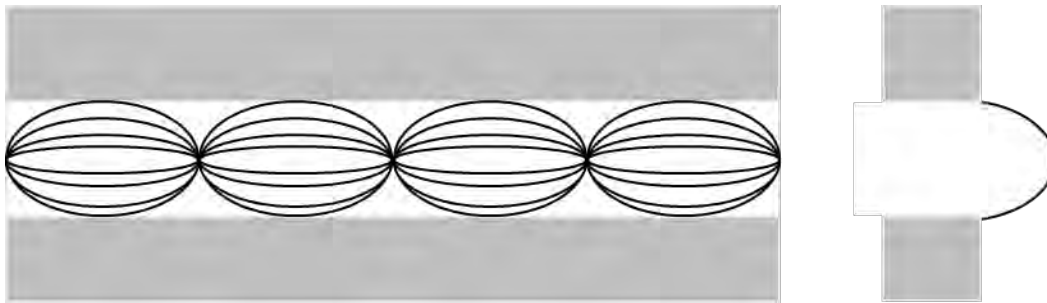


Figura 6. Multimodo de índice gradual

2.4 Tipos de atenuaciones o pérdidas que se presentan en la fibra óptica

2.4.1 Atenuación

La atenuación es la pérdida o disminución de potencia que sufren los impulsos de luz a lo largo de la fibra. Es decir que la potencia con la que incide la señal a la fibra no es la misma potencia de salida. Estas pérdidas suceden por diferentes factores.

Para calcular la atenuación en la fibra, se presenta la siguiente ecuación.

Ecuación 1

$$\alpha_{dB} = - \frac{10}{L} \log \frac{P_T}{P_0}$$

P_0 = es la potencia inicial, con la que incide a la fibra óptica.

L = es la longitud de la fibra óptica.

P_T = es la potencia transmitida.

α = la atenuación en dB o pérdida en dB.

2.4.2 Atenuación por curvaturas

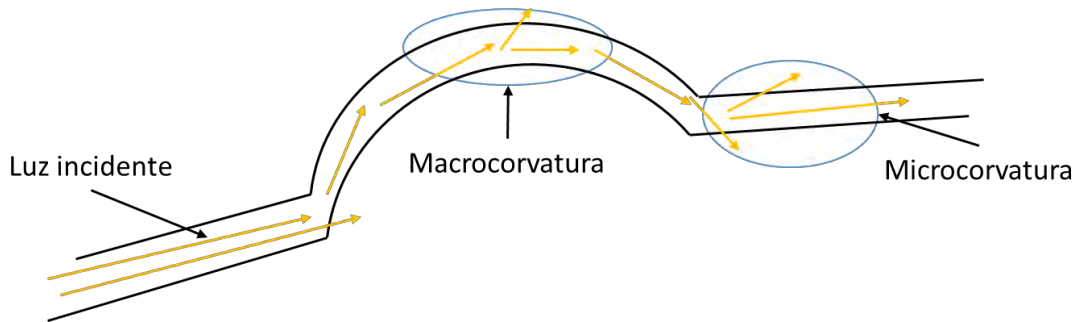


Figura 7. Pérdida por curvatura

Cuando la fibra presenta curvas que puedan dañarla, se presentan estas atenuaciones, en la Figura 7 se muestran los dos tipos de curvaturas que provocan las atenuaciones.

Las micro curvaturas, son algo complicado de localizarlas, pues son muy pequeñas. Sin embargo, a pesar de que el daño a la fibra es muy pequeño, este puede estar provocando pérdida de señal, que a su salida la potencia disminuya.

Las macro curvaturas son curvas muy grandes provocados a la fibra al momento de enrollarla o tenderla.

2.4.3 Pérdidas por empalme

Cuando dos extremos de fibras diferentes se unen mediante empalme, se genera una pérdida, pues los ejes de las fibras son invisibles para el ojo humano y es muy difícil que estos queden en la misma precisión, además de que los residuos del recubrimiento pueden inferir también.

Se recomienda que, para evitar la mayor pérdida, las fibras deben estar correctamente cortados y limpios al momento de ingresarlas al equipo de empalme.

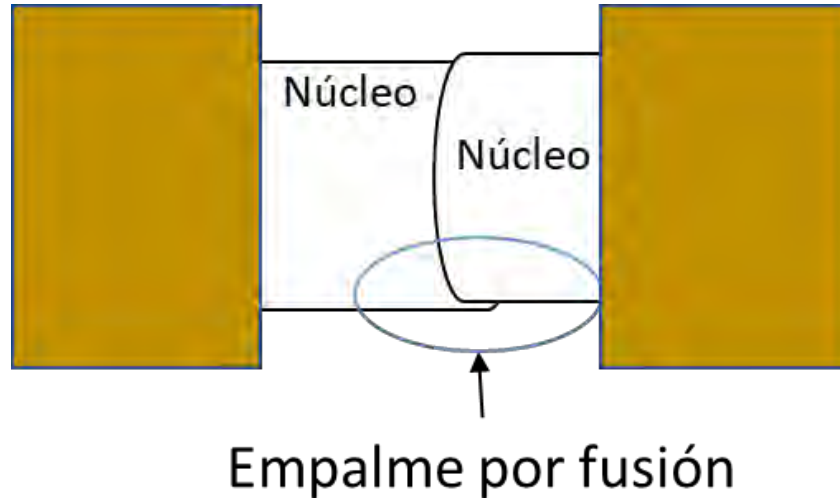


Figura 8. Pérdida por fusión

2.4.4 Pérdidas por absorción

Otro tipo de pérdidas son por absorción del material, estas pérdidas son ocasionadas por impurezas de la fibra óptica como iones metálicos, moléculas de agua, níquel variado, entre otros. Estas impurezas atrapan la luz que pasa por ellas y la transforman en calor atenuando la luz. Las mejores fibras usan vidrio muy puro para su fabricación y aun así solo tienen 99.999% de pureza, lo que puede generar pérdidas por absorción entre 1 y 1000 dB/km (2)

2.4.5 Dispersión

Es un fenómeno que ocurre cuando un impulso luminoso se transmite a través de una fibra óptica y experimenta un ensanchamiento en el tiempo. Este ensanchamiento, cuya magnitud estará en función de la longitud de la fibra, limita el ancho de banda y por tanto la capacidad de la fibra para transmitir información. El fenómeno de dispersión se debe principalmente a los siguientes mecanismos:

2.4.5.1 Dispersión modal

La dispersión modal se debe a que en cada uno de los modos en que se descompone la mediación luminosa que accede al núcleo, sigue una trayectoria distinta. Esta diferencia se traduce en que los distintos modos emplean tiempos diferentes en recorrer la misma longitud de fibra, con lo que aparecen retardos relativos entre modos en el extremo distante de la fibra, dando lugar a un ensanchamiento de los impulsos. A este tipo de dispersión, por producirse entre modos distintos también se le conoce como dispersión intermodal.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3 Fenómenos de la polarización en las fibras ópticas

3.1 Polarización de la luz en la fibra óptica

La polarización de la luz en la fibra óptica es un comportamiento que se determina por la dirección de los vectores del campo eléctrico. Entonces, en cada posición, el extremo final del vector del campo eléctrico se mueve en un plano y traza una elipse. La orientación y forma de la elipse son determinadas por el estado de polarización, mientras que su tamaño es determinado por la intensidad óptica (5).

La descripción del estado de polarización de las ondas de luz (lineal, circular o elíptico) propuesta por R. Jones (Jones, R. Clark, 1941), utiliza un sistema cartesiano xyz de mano derecha. En él se define al plano xy como el plano de polarización, sobre el que se proyecta al campo vectorial eléctrico para definir al estado de polarización de la luz (6).

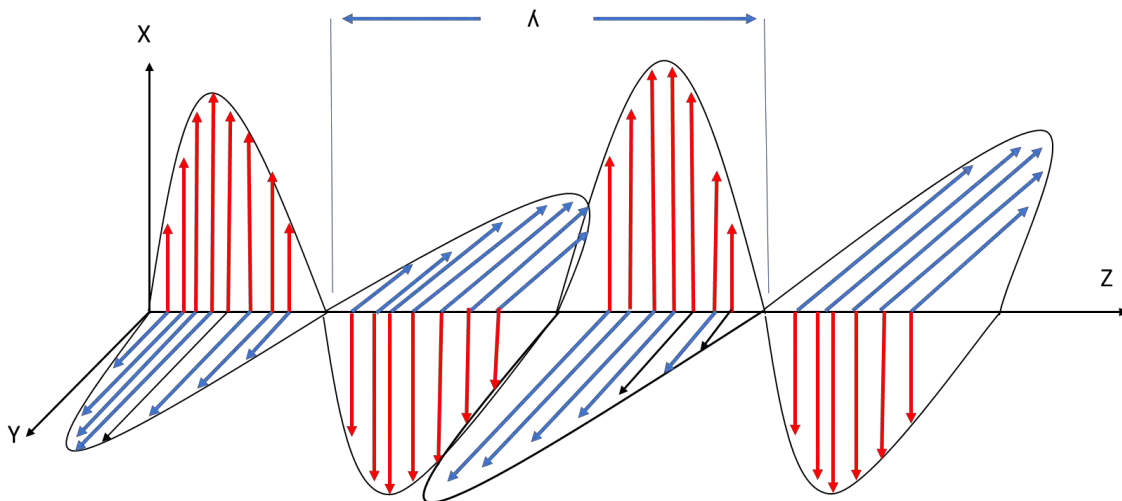


Figura 9. Campos vectoriales: eléctrico y magnético de una onda transversal viajando en la

Existen 3 diferentes tipos de polarización de la luz (lineal, circular, elíptica), la forma que traza sobre un plano fijo por un vector de campo eléctrico de una onda plana es una curva de Bowditch, y esta sirve para identificar el tipo de polarización de onda.

3.1.1 Lineal

Cuando una onda electromagnética oscila de arriba-abajo a lo largo de una línea vertical, podemos decir que la luz se encuentra linealmente polarizada. La luz del sol y la radiación que emite la tierra no están polarizadas y son un número enorme de ondas orientadas de manera aleatoria que se encuentran linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles.

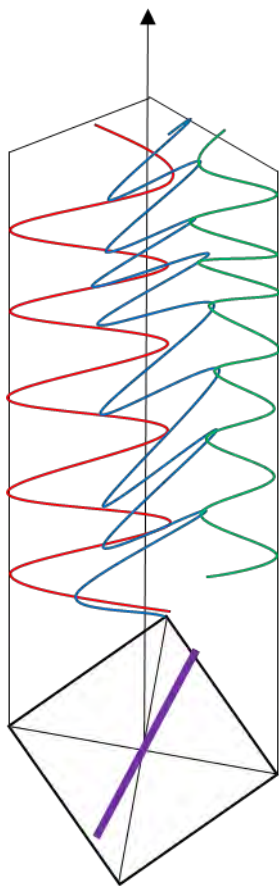


Figura 10. Polarización lineal

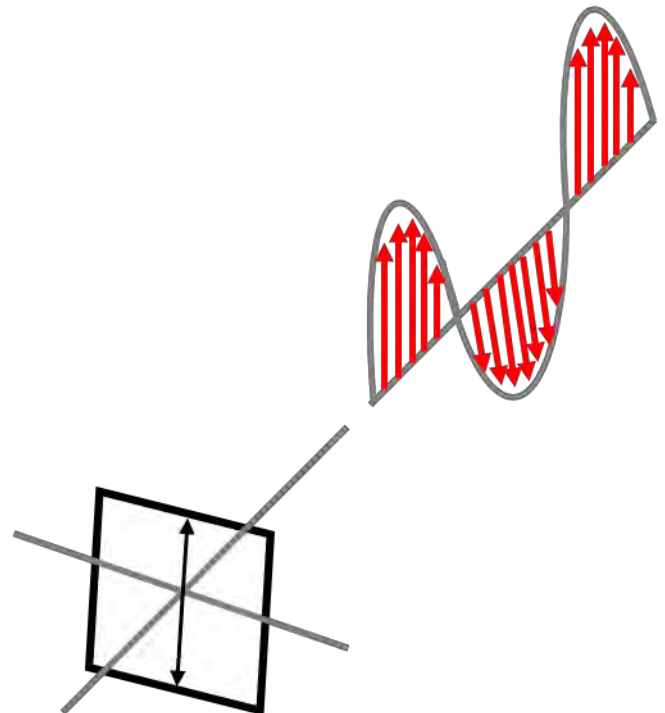


Figura 11. Luz linealmente polarizada

3.1.2 Circular

La polarización circular se da cuando la luz está compuesta por dos ondas planas de igual magnitud y con una diferencia de fase de 90° . El campo eléctrico que viaja a través de la fibra óptica toma la forma de un círculo a medida que se acerca. Si el campo eléctrico de la luz pareciera girar en sentido opuesto del reloj, se dice que la polarización de la luz es circularmente hacia la derecha. Sin embargo, si pareciera girar en el sentido del reloj, decimos que se encuentra polarizada circularmente hacia la izquierda.

La luz polarizada circularmente se puede producir haciendo pasar la luz polarizada linealmente a través de una placa de un cuarto de onda con un ángulo incidente de 45° respecto del eje óptico de la placa.

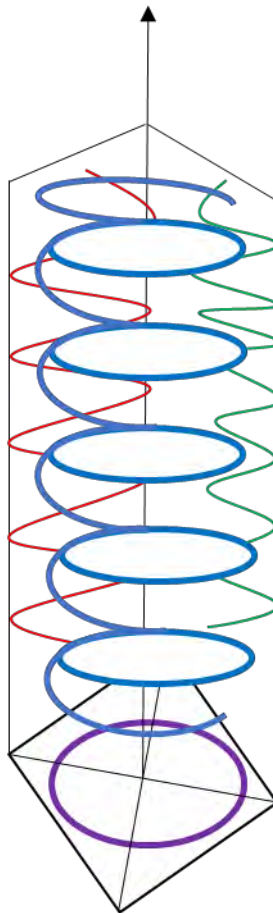


Figura 12. Luz polarizada circularmente hacia la izquierda

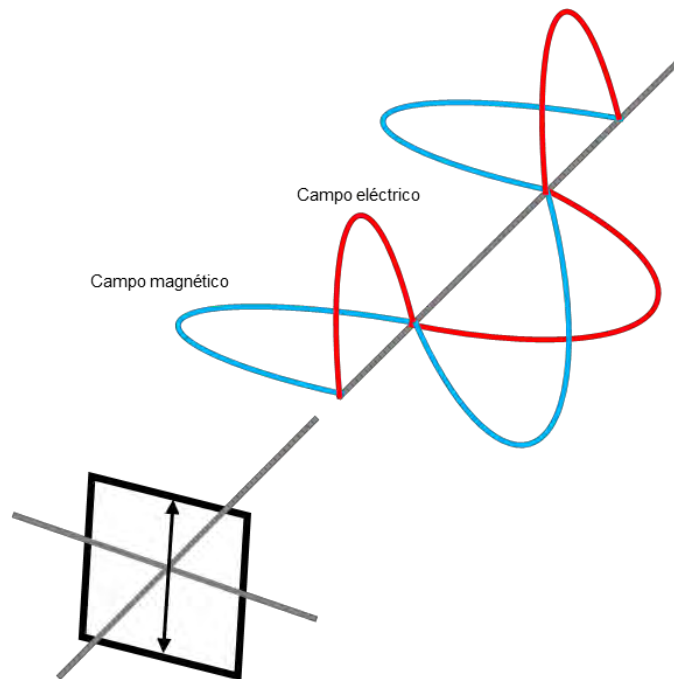


Figura 13. Polarización circular

3.1.3 Elíptica

Dos ondas perpendiculares con amplitudes desiguales y una diferencia de fase de 90° forman la polarización elíptica.

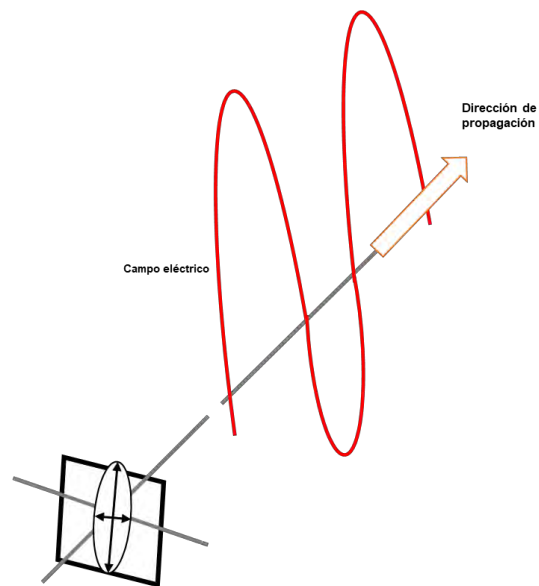


Figura 14. Propagación de polarización de la luz

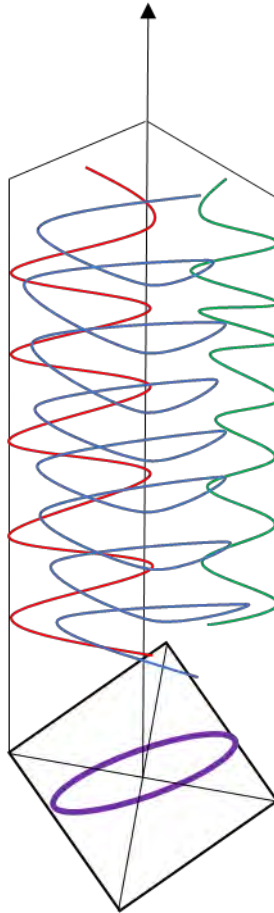


Figura 15. Polarización elíptica

3.2 Placas retardadoras y polarizadoras

3.2.1 Polarizador

Los polarizadores son dispositivos que seleccionan una dirección de vibración de la luz sobre un eje de transmisión. Después de que una luz natural pase por el polarizador, emergerá como luz linealmente polarizada en la dirección seleccionada mediante la orientación del eje de transmisión del polarizador (8).

El eje perpendicular al de transmisión, se denomina eje de extensión.



Figura 16. Polarizador lineal

Si por un polarizador lineal incide luz linealmente polarizada, la intensidad transmitida resulta como se muestra en la ecuación 2:

Ecuación 2

$$I_t = I_0 \cos^2 \alpha$$

α Ángulo formado entre la dirección de vibración de luz incidente y el eje de transmisión del polarizador.

Si por un polarizador incide luz circular o elíptica, emergerá luz linealmente polarizada según su eje de transmisión.

3.2.2 Placa retardadora

Las láminas o placas retardadoras están formadas por materiales birrefringentes, por lo general, por medios cristalinos anisótropos. Se tallan de forma, que, al incidir un haz de luz a través de la lámina, los componentes que vibran según las líneas neutras emergen con un cierto desfase entre ellas.

Ecuación 3

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)d$$

- Δ diferencia del camino óptico en el interior de la lámina entre la componente que presenta índice de refracción n_e y n_o .
- n_e índice de refracción extraordinaria.
- n_o índice de refracción ordinaria.



Figura 17. Placa retardadora

Si sobre una lámina de $\lambda/4$ índice luz natural, a la salida se obtiene luz natural, puesto que el desfase introducido entre las componentes ordinarias y extraordinarias no afecta al resto de direcciones de la luz incidente.

Si sobre una lámina de $\lambda/4$ incide luz elípticamente polarizada, el resultado dependerá de la dirección de vibración incidente.

Si sobre una lámina de $\lambda/4$ incide luz elípticamente polarizada, el resultado dependerá de la dirección de vibración incidente. (8)

Incidente	Resultado
Linealmente polarizada, según una línea neutra	Luz linealmente polarizada, según la misma línea neutra
Linealmente polarizada, en cualquier otra dirección	Elípticamente polarizada
Linealmente polarizada a 45°	Circularmente polarizada
Elípticamente polarizada con sus ejes coincidentes con las líneas neutras	Linealmente polarizada
Elípticamente polarizada con sus ejes no coincidentes con las líneas neutras y sin formar 45° con ellas	Elípticamente polarizada

Tabla 1. Estados emergentes de una lámina de $\lambda/4$

3.3 Interferómetro de SAGNAC

El interferómetro de Sagnac consiste en un acoplador de fibra bidireccional de cuatro puertos. De los cuáles dos de los puertos de salida se unen para formar una trayectoria cerrada conocido como el lazo de Sagnac. (7)

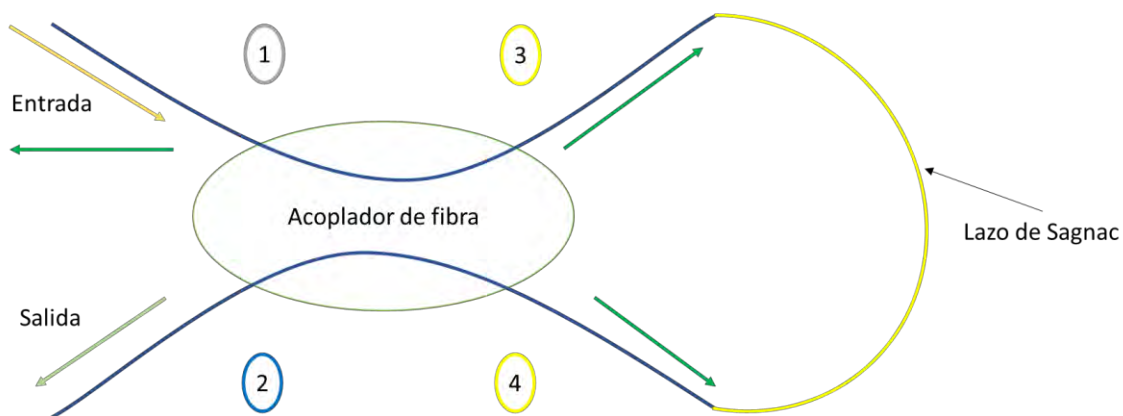


Figura 18. Interferómetro de Sagnac

- Puerto 1, entrada.
- Puerto 2, salida.
- Puerto 3, salida al lazo.
- Puerto 4, salida al lazo.

Cuando una señal entra al acoplador, se divide en dos campos de amplitudes complementarias con una diferencia de fase de $\pi/2$ entre ellas. Cada uno de estos campos salen a través de los puertos de salida (3 y 4) recorriendo la trayectoria del lazo de Sagnac, de manera que ambos regresan al acoplador de fibra y nuevamente son enviados a través de cada puerto (1 y 2). Al volver a pasar por el acoplador, dos ondas interferirán, dando lugar a dos ondas diferentes, transmitida y reflejante con una diferencia de fase que puede ser diferente de $\pi/2$. Cuando $\rho = 0.5$ las dos señales que se contra propagan experimentan la misma atenuación, y cuando interfieren, la potencia en el puerto de salida es nula. En tales condiciones el interferómetro actúa como un espejo y toda la potencia es reflejada. El interferómetro mantiene casi el mismo comportamiento para cualquier señal; sin embargo, insertando un elemento no-lineal en el lazo se puede introducir un desplazamiento de fase dependiente de la potencia donde el interferómetro se puede utilizar para varias aplicaciones. (8)

Un interferómetro de Sagnac de fibra se puede diseñar fácilmente mediante la conexión de un segmento de fibra en los puertos de salida del acoplador.

3.4 Parámetros de Stokes

Actualmente la radiación electromagnética es una onda transversal de los campos eléctricos y magnéticos en dirección perpendicular a la dirección preferencial.

La luz que emite el sol, el fuego, un foco o cualquier fuente conocida, son haces de luz denominadas no polarizadas o luz natural. Sin embargo, este tipo de luz puede convertirse en luz polarizada. Por lo tanto, la polarización se define como la descripción de la vibración del campo eléctrico E . En particular, para definir el estado de polarización siempre se elige a E y no a B . Esta elección se basa en que, cuando la luz interacciona con la materia, la fuerza ejercida sobre los electrones por el campo eléctrico E de las ondas de luz es mucho mayor que la fuerza ejercida por el campo magnético B de las mismas ondas (9).

El estado de polarización de diversas ondas de luz puede ser analizadas de dos maneras.

1. Haciendo uso de la formulación de amplitud del campo óptico E .
2. Representando el campo óptico en términos de observables, es decir, tomando un promedio en el tiempo del cuadrado de la amplitud $\langle E^2(t) \rangle$.

Considerando una onda plana de frecuencia ω propagándose en dirección al plano z con componentes transversales que se representan de la siguiente manera.

Ecuación 4

$$\begin{pmatrix} E_x(z, t) \\ E_y(z, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\tau + \delta_x) & 0 \\ 0 & \cos(\tau + \delta_y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{pmatrix}$$

Donde:

- E_x Y E_y son amplitudes máximas.
- δ_x Y δ_y son las fases iniciales.
- $\tau = \omega t - kz$ es el propagador de la luz.

Los subíndices x y y se refieren a las componentes en las direcciones x y y , del plano cartesiano respectivamente.

Mientras el campo se propaga, da lugar a un vector resultante que describe un lugar geométrico de puntos en el espacio.

Ecuación 5

$$\begin{pmatrix} \frac{E_x}{E_{0x}} \\ \frac{E_y}{E_{0y}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \tau \cos \delta_x - \sin \tau \sin \delta_x & 0 \\ 0 & \cos \tau \cos \delta_y - \sin \tau \sin \delta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Cancelando τ , se obtiene:

Ecuación 6

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta$$

donde $\delta = \delta_y - \delta_x$

La ecuación 6, representa la ecuación de una elipse donde muestra que en cualquier instante el lugar geométrico de puntos descritos por el campo conforme a este se propaga. Este comportamiento se conoce como polarización óptica elíptica.

La polarización elíptica es la base para la polarización lineal, pues estas nos son más que una elipse muy cerrada que al incidir a través de la fibra sus ondas electromagnéticas se asemejan a una línea. En el caso de la polarización circular, la elipse se abre de manera que las ondas asemejan un círculo.

La ecuación 6, se puede representar en términos observables del campo óptico, tomando un promedio alrededor del tiempo.

Ecuación 7

$$\langle E_i(t)E_j(t) \rangle = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(t)E_j(t)dt$$

Promediando la ecuación 6 y multiplicando por $4E_{0x}^2E_{0y}^2$, se obtiene

Ecuación 8

$$\begin{aligned} 4E_{0y}^2 \langle E_x^2(t) \rangle + 4E_{0x}^2 \langle E_y^2(t) \rangle - 8E_{0x}E_{0y} \langle E_x(t) E_y(t) \rangle \cos \delta \\ = (2E_{0x}E_{0y} \sin \delta)^2 \end{aligned}$$

Aplicando la ecuación 7 a la ecuación 4, se encuentra que los valores promedio de la ecuación 8 son

Ecuación 9

$$\begin{aligned} \langle E_x^2(t) \rangle &= \frac{1}{2} E_{0x}^2 \\ \langle E_y^2(t) \rangle &= \frac{1}{2} E_{0y}^2 \\ \langle E_x(t) E_y(t) \rangle &= \frac{1}{2} E_{0x}E_{0y} \cos \delta \end{aligned}$$

Sustituyendo la ecuación 9 en la ecuación 8, obtenemos

Ecuación 10

$$\begin{aligned} (E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^2 - (E_{0x}^2 - E_{0y}^2)^2 - (E_{0x}E_{0y} \cos \delta)^2 \\ = (2E_{0x}E_{0y} \operatorname{sen} \delta)^2 \end{aligned}$$

Escribiendo las cantidades dentro de paréntesis

Ecuación 11

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 = E_x E_x^* + E_y E_y^*$$

Ecuación 12

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 = E_x E_x^* - E_y E_y^*$$

Ecuación 13

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta = E_x E_y^* + E_y E_x^*$$

Ecuación 14

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \operatorname{sen} \delta = i(E_x E_y^* - E_y E_x^*)$$

Finalmente, la ecuación se expresa:

Ecuación 15

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$$

Las cuatro ecuaciones (ecuación 11-14) están expresadas en términos de intensidades y son conocidas como los parámetros de polarización de Stokes de una onda plana.

Los parámetros de Stokes son cantidades reales y observables de la elipse de polarización.

- El parámetro S_0 es la intensidad total de la luz.
- El parámetro S_1 describe la cantidad de polarización lineal horizontal o vertical.
- El parámetro S_2 describe la cantidad de polarización lineal $+45^\circ$ o -45° .
- El parámetro S_3 describe la cantidad de polarización circular a izquierda o derecha contenida dentro del haz.

El grado de polarización P del campo está definido como

Ecuación 16

$$P = \frac{I_{pol}}{I_{tot}} = \left(\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}{S_0} \right)^{1/2} \quad 0 \leq P \leq 1$$

donde I_{pol} es la intensidad de la suma de las componentes de polarización y I_{tot} es la intensidad total del haz. El valor de $P = 1$ corresponde a luz completamente polarizada, $P = 0$ corresponde a luz no polarizada, y $0 < P < 1$ corresponde a luz parcialmente polarizada. (9)

Los parámetros de Stokes se pueden medir directamente, tal que son cantidades observables. Para calcularlos, es necesario medir la intensidad en cuatro pares de ángulos. Los primeros tres parámetros de Stokes son medidos quitando el retardador ($\phi=0^\circ$) y rotando el eje de transmisión del polarizador a ángulos $\theta=0^\circ, 45^\circ$ y 90° , respectivamente. El parámetro S_3 , es medido reinsertando un retardador de un cuarto de onda ($\phi=90^\circ$) y ajustando el eje de transmisión del polarizador a $\theta=45^\circ$.

Las intensidades encontradas a partir de la ecuación

Ecuación 17

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ) \\ I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \\ -I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) + 2I(45^\circ, 0^\circ) \\ -I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) + I(45^\circ, 90^\circ) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I(0^\circ, 0^\circ) \\ I(90^\circ, 0^\circ) \\ I(45^\circ, 0^\circ) \\ I(45^\circ, 90^\circ) \end{pmatrix}$$

De acuerdo con la ecuación anterior, se requieren por lo menos 4 resultados para determinar el grado de polarización. (9)

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4 Configuración experimental

4.1 Diagrama experimental

Para la realización de este proyecto se necesitaron los siguientes elementos:

- Láser con pigtail.
- Aislador óptico.
- Controlador manual de polarización (CMP) de tres paletas.
- Interferómetro de Sagnac.
- 300 metros de fibra SMF-28.
- Potenciómetro.

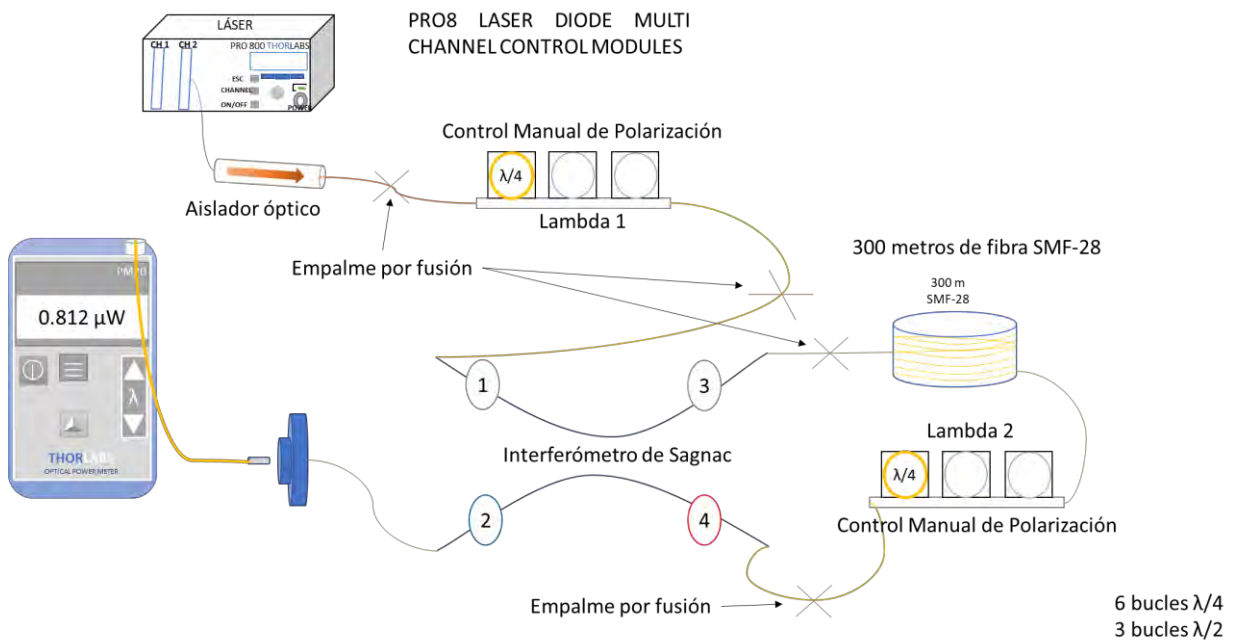


Figura 19. Diagrama experimental

En la Figura 19 anterior se muestra el diagrama experimental del presente proyecto a desarrollar. El láser se conecta a un aislador óptico, para que la luz que refleja el interferómetro no regrese a través de la fibra y termine dañando al equipo.

El aislador se conecta a una paleta del controlador manual de polarización configurado como $\lambda/4$ con fibra SMF-28 y está conectada por medio de empalme al puerto número 1 del interferómetro de Sagnac y el potenciómetro se conectará al puerto número 2. Finalmente, los puertos 3 y 4 se conectan a la fibra óptica y una segunda paleta del controlador también configurado como $\lambda/4$.

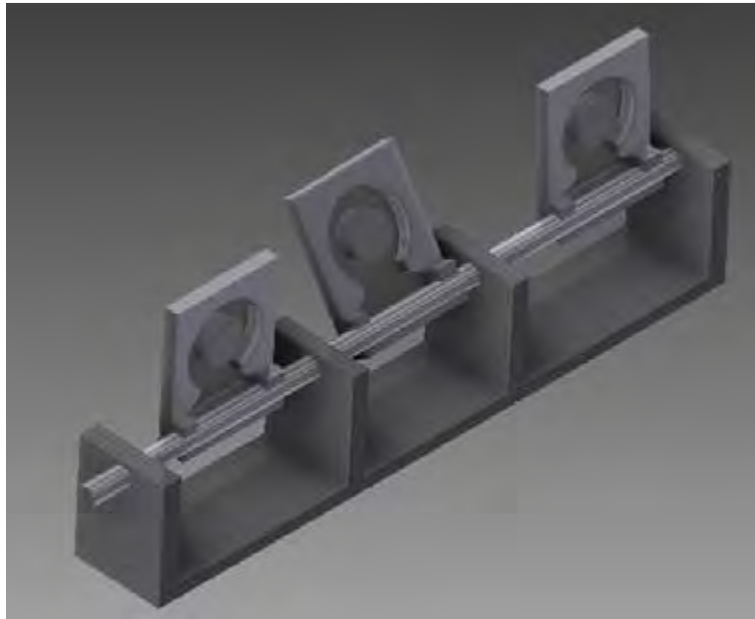


Figura 20. Controlador manual de polarización de tres paletas

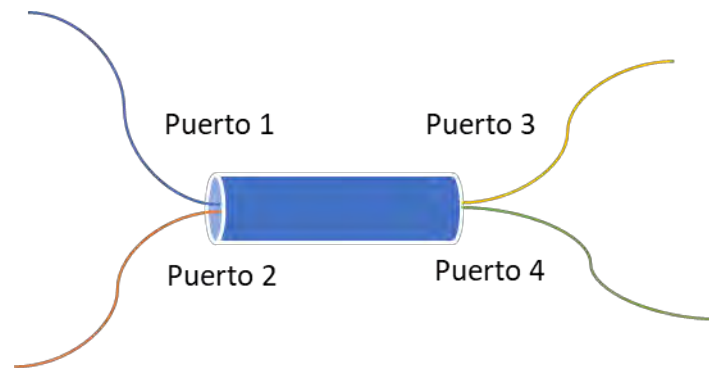


Figura 21. Interferómetro de Sagnac (acoplador)

En cada una de las fusiones realizadas se generaron ciertas pérdidas estimadas, estas se presentan a continuación en la siguiente tabla.

Pérdidas estimadas por fusión		
Elemento 1 de fusión	Elemento 2 de fusión	Pérdidas en dBm
Pigtail	Aislador óptico	0.01
Aislador óptico	$\lambda/4$	0.01
$\lambda/4$	Puerto 1 del acoplador	0.05
Puerto 3 del acoplador	Extremo 1 de fibra	0.03
Extremo 2 de fibra	$\lambda/4$	0
$\lambda/4$	Puerto 4 del acoplador	0
Puerto 2 del acoplador	Adaptador para el potenciómetro	0.01
Total, de pérdida		0.11

Tabla 2. Pérdidas estimadas por empalme

La fibra fue enrollada en una bandeja con un diámetro que va desde 55 cm hasta los 75 cm (Figura 22), cuidando la rotación del eje. Conectando un extremo mediante fusión al retardador $\lambda/4$ (lambda 2) en el CMP y el otro a un brazo del interferómetro de Sagnac.



Figura 22. Bandeja

4.2 Determinación y control del estado de polarización a la salida de un láser

Para el presente proyecto, se realizaron pruebas directamente con el láser para determinar la polarización de la luz que emitía el PRO8 LASER DIODE MULTI CHANNEL CONTROL MODULES, con ayuda de dos polarizadores lineales, una placa retardadora $\lambda/4$, un colimador y finalmente un medidor de potencia.

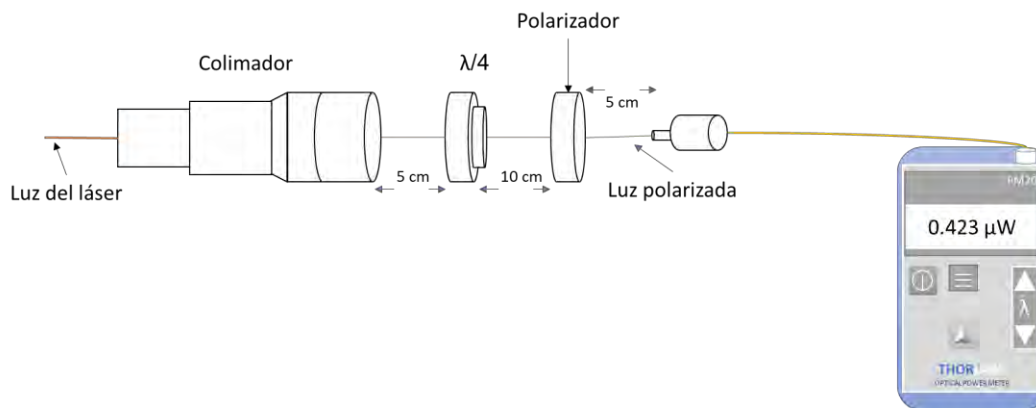


Figura 23. Diagrama experimental

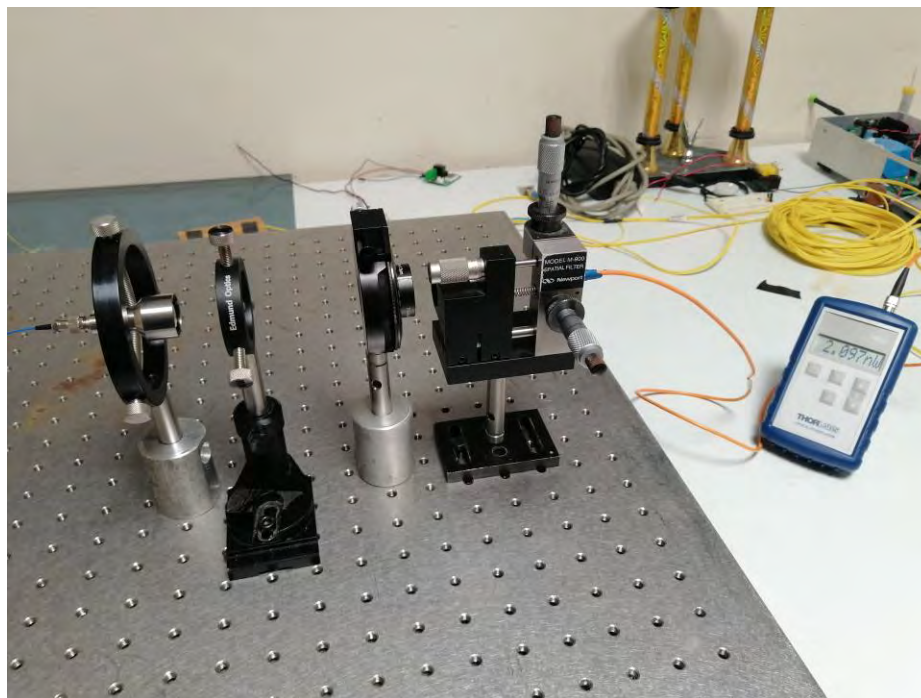


Figura 24. Implementación del diagrama en el laboratorio de la UNACAR

Basado en el diagrama experimental, se implementó con los equipos apropiados para realizar las pruebas correspondientes que determinen el estado de polarización de la luz que emite el láser. Utilizando bases metálicas se colocaron una frente a la otra. El colimador se empalmó al pigtail del láser teniendo una pérdida de 0.02 dBm y se colocó fijamente para evitar movimiento.

Se ingresó la luz del láser a través del colimador y la dejamos pasar a través de la placa retardadora $\lambda/4$ con su eje de transmisión a 45° , posteriormente a través de un polarizador y finalmente a un detector de potencia (potenciómetro) basándonos en los parámetros de Stokes obtuvimos los siguientes resultados.

Para

$$S_0 = 4.18 \text{ w/m}^2$$

$$S_1 = 4.23 \text{ w/m}^2$$

$$S_2 = 0.003 \text{ w/m}^2$$

$$S_3 = 0.001 \text{ w/m}^2$$

	Matriz	Resultado de la matriz
S0	$I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ)$	0.00000418
S1	$I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ)$	-0.00000423
S2	$-I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) + 2I(45^\circ, 0^\circ)$	0.000000003
S3	$-I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) + 2I(45^\circ, 90^\circ)$	-0.000000001

Tabla 3. Pruebas del láser

Con los datos obtenidos y basándonos con los parámetros de Stokes, podemos decir que la luz que incide antes del polarizador es una luz circularmente polarizada, por lo que, de acuerdo a los estudios realizados, se dice que la luz que emite el láser es linealmente polarizada, pues al pasar por la placa retardadora se convirtió en polarización circular.

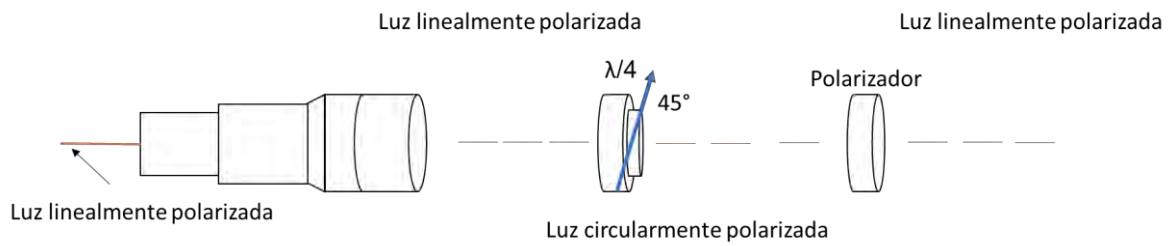


Figura 25. Diagrama experimental del láser

De acuerdo con la siguiente ecuación:

Ecuación 18.

$$S' = \frac{1}{2} [(S_0 + S_1 (\cos^2 2\theta)) + S_2 (\sin 2\theta \cos 2\theta) - S_3 (\sin 2\theta)]$$

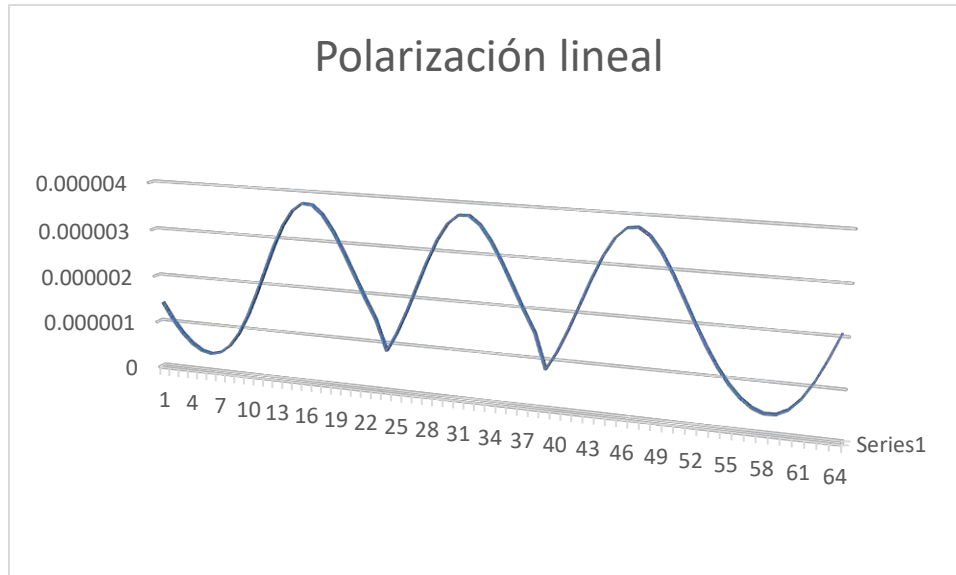
El ángulo θ tiene valores que va desde 0° a 190° , incrementando cada $+5^\circ$.

Ángulo θ	Cos ² de θ	Sen (2θ)
0	1	0
5	0.70404103	-0.54402111
10	0.16653097	0.91294525
15	0.02379351	-0.98803162
20	0.44480638	0.74511316
25	0.93115944	-0.26237485
30	0.90709049	-0.30481062
35	0.40109321	0.77389068
40	0.01218534	-0.99388865
45	0.20076997	0.89399666
50	0.74359384	-0.50636564
55	0.99804259	-0.04424268
60	0.66289065	0.58061118
65	0.13490292	-0.93010595
70	0.03913021	0.98023966
75	0.48895169	-0.71487643
80	0.95185256	0.21942526
85	0.87983416	0.34664946
90	0.35815445	-0.80115264
95	0.0043966	0.99779928
100	0.23735183	-0.8732973
105	0.78123939	0.46771852
110	0.99218567	0.08839871
115	0.6204649	-0.6160642
120	0.10613346	0.94544515
125	0.05807536	-0.97052802
130	0.53318351	0.6832397
135	0.96900782	-0.17604595
140	0.84960385	-0.38780942
145	0.3163263	0.82684563
150	0.00048826	-0.99975584
155	0.27599014	0.85088769
160	0.81668293	-0.42815543
165	0.9824751	-0.13238163
170	0.57709594	0.65031074
175	0.08044784	-0.95893283
180	0.08048064	0.95891572
185	0.57715551	-0.65026494
190	0.98249092	0.13232187

Tabla 4. Valores obtenidos del láser, %

S0	S1Cos ² (2θ)	S2 Sin(2θ) Cos (2θ)	S3 Sin (2θ)	Ecuación final
0.00000418	-0.00000423	0	0	-2.5E-08
	-2.97809E-06	1.36942E-09	5.44021E-10	-1.48863E-06
	-7.04426E-07	1.11767E-09	-9.12945E-10	-3.51198E-07
	-1.00647E-07	-4.57216E-10	9.88032E-10	-5.10459E-08
	-1.88153E-06	-1.49083E-09	-7.45113E-10	-9.41138E-07
	-3.9388E-06	-7.59548E-10	2.62375E-10	-1.96991E-06
	-3.83699E-06	8.70917E-10	3.04811E-10	-1.91821E-06
	-1.69662E-06	1.47036E-09	-7.73891E-10	-8.4719E-07
	-5.1544E-08	3.29138E-10	9.93889E-10	-2.61044E-08
	-8.49257E-07	-1.20173E-09	-8.93997E-10	-4.24782E-07
	-3.1454E-06	-1.30995E-09	5.06366E-10	-1.57361E-06
	-4.22172E-06	1.32598E-10	4.42427E-11	-2.11082E-06
	-2.80403E-06	1.41817E-09	-5.80611E-10	-1.40101E-06
	-5.70639E-07	1.02486E-09	9.30106E-10	-2.85272E-07
	-1.65521E-07	-5.81714E-10	-9.8024E-10	-8.25611E-08
	-2.06827E-06	-1.49963E-09	7.14876E-10	-1.03524E-06
	-4.02634E-06	-6.42233E-10	-2.19425E-10	-2.01338E-06
	-3.7217E-06	9.75466E-10	-3.46649E-10	-1.86019E-06
	-1.51499E-06	1.43837E-09	8.01153E-10	-7.57178E-07
	-1.85976E-08	1.98483E-10	-9.97799E-10	-8.70067E-09
	-1.004E-06	-1.27638E-09	8.73297E-10	-5.03074E-07
	-3.30464E-06	-1.24022E-09	-4.67719E-10	-1.65271E-06
	-4.19695E-06	2.64158E-10	-8.83987E-11	-2.0983E-06
	-2.62457E-06	1.45581E-09	6.16064E-10	-1.31186E-06
	-4.48945E-07	9.24025E-10	-9.45445E-10	-2.23538E-07
	-2.45659E-07	-7.01658E-10	9.70528E-10	-1.23665E-07
	-2.25537E-06	-1.49669E-09	-6.8324E-10	-1.12809E-06
	-4.0989E-06	-5.19889E-10	1.76046E-10	-2.0498E-06
	-3.59382E-06	1.07238E-09	3.87809E-10	-1.79657E-06
	-1.33806E-06	1.39513E-09	-8.26846E-10	-6.67919E-07
	-2.06534E-09	6.62737E-11	9.99756E-10	-1.49941E-09
	-1.16744E-06	-1.34104E-09	-8.50888E-10	-5.83964E-07
	-3.45457E-06	-1.16078E-09	4.28155E-10	-1.72808E-06
	-4.15587E-06	3.9365E-10	1.32382E-10	-2.0778E-06
	-2.44112E-06	1.48206E-09	-6.50311E-10	-1.21949E-06
	-3.40294E-07	8.15956E-10	9.58933E-10	-1.70219E-07
	-3.40433E-07	-8.16108E-10	-9.58916E-10	-1.70145E-07
	-2.44137E-06	-1.48203E-09	6.50265E-10	-1.22175E-06
	-4.15594E-06	-3.93475E-10	-1.32322E-10	-2.0781E-06

Tabla 5. Valores obtenidos del láser, parte 2/2



Gráfica 1. Polarización del laser

Finalmente concluimos que la luz que emite el láser es polarizada linealmente horizontal.

4.3 Implementación y caracterización de una placa $\lambda/4$

Para controlar la polarización de la luz mediante las paletas del controlador manual de polarización (CMP) fue necesario realizar la configuración de $\lambda/4$ en una de sus paletas utilizando cierta cantidad de bucles. Para ello, se utilizó la siguiente ecuación de retardancias:

Ecuación 19

$$\varphi(\text{radianes}) = \frac{2\pi^2 aNd^2}{\lambda D}$$

Ecuación 20

$$\varphi(\text{No. ondas}) = \frac{\pi aNd^2}{\lambda D}$$

- a: 0.133.
- N: es el número de bucles en la paleta.
- d: diámetro del revestimiento del núcleo.
- λ : es la longitud de onda empleada.

- D: es el diámetro del bucle.

Para el cálculo del cálculo se usaron los siguientes valores.

- a: 0.133.
- N: de 1 a 8 bucles.
- d: 8.2 μm
- λ : 1260 nm.
- D: 56 mm.

(7)

Ecuación 21

$$\varphi(\text{No. ondas}) = \frac{\pi (0.133)(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)(5 \times 10^{-6})^2}{(1260 \times 10^{-9} \text{ nm})(0.056 \text{ m})}$$

No. Bucles	1	2	3	4	5	6	7	8
Retardancias	0.00039817	0.00079634	0.00119452	0.00159269	0.00199086	0.00238903	0.0027872	0.00318538

Para calcular el número de bucles se utilizó la siguiente ecuación. (7) tomando como referencia el ángulo $\theta=90^\circ$:

Ecuación 22

$$= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta & \text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma}) \\ \text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma}) & \text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta \end{bmatrix}$$

Tomando en cuenta que $j\Gamma = \varphi$ (8) se realizaron los cálculos para los bucles correspondientes para la configuración de $\lambda/4$ buscando el mínimo error.

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.160397508		-0.000159466
$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.000159466		-0.00028679

Error	7.33551E-09
-------	-------------

Tabla 6. Error estimado para 1 bucle

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.160333655		-0.000318869
$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.000318869		-0.000573339

Error	2.93122E-08
-------	-------------

Tabla 7. Error estimado para 2 bucles

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.160269827		-0.000478209
$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.000478209		-0.000859647

Error	6.58854E-08
-------	-------------

Tabla 8. Error estimado para 3 bucles

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.160206025		-0.000637485
$\text{sen} \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.000637485		-0.001145714

Error	1.1701E-07
-------	------------

Tabla 9. Error estimado para 4 bucle

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.160142248		-0.000796697
$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.000796697		-0.001431541

Error	1.82643E-07
-------	-------------

Tabla 10. Error estimado para 5 bucles

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.160078497		-0.000955847
$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.000955847		-0.001717128

Error	2.62739E-07
-------	-------------

Tabla 11. Error estimado para 6 bucles

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.160014771		-0.001114932
$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.001114932		-0.002002474

Error	3.57253E-07
-------	-------------

Tabla 12. Error estimado para 7 bucles

$\cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \text{sen}^2 \theta$		$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$
0.15995107		-0.001273955
$\text{sen } \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma})$		$\text{sen}^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta$
-0.001273955		-0.002287581

Error	4.66141E-07
-------	-------------

Tabla 13. Error estimado para 8 bucles

Por lo que finalmente configuramos la paleta con 3 bucles para $\lambda/4$ y 6 para $\lambda/2$, ya que los errores son mínimos y esto ayudará a que la polarización sea casi exacta.

4.4 Implementación del interferómetro de Sagnac

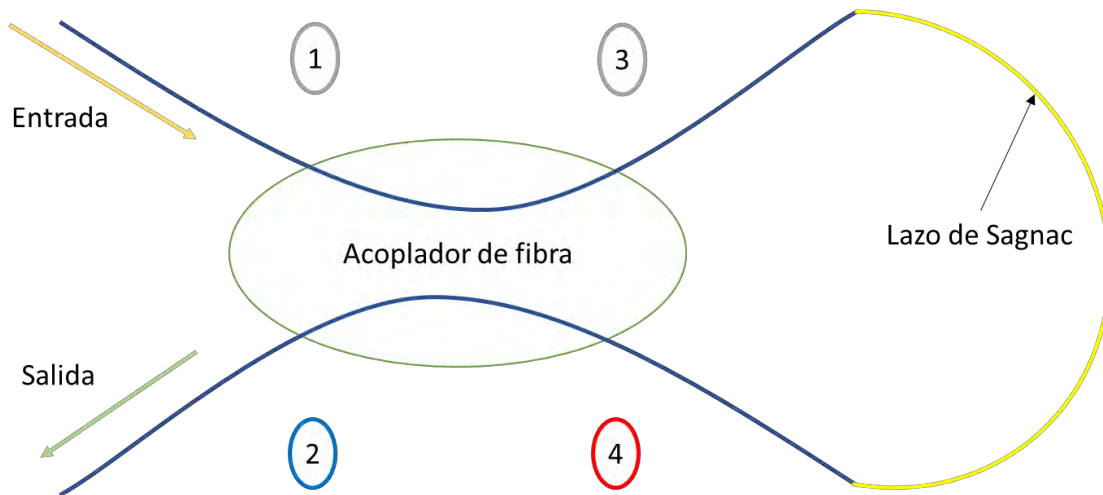


Figura 26. Esquema del funcionamiento del interferómetro de Sagnac

La estructura del interferómetro de fibra óptica con acoplador direccional con cuatro puertos, permite que la luz incida por el puerto 1, por el puerto 2 se obtenga la onda transmitida y el puerto 3 y 4 formen una trayectoria cerrada

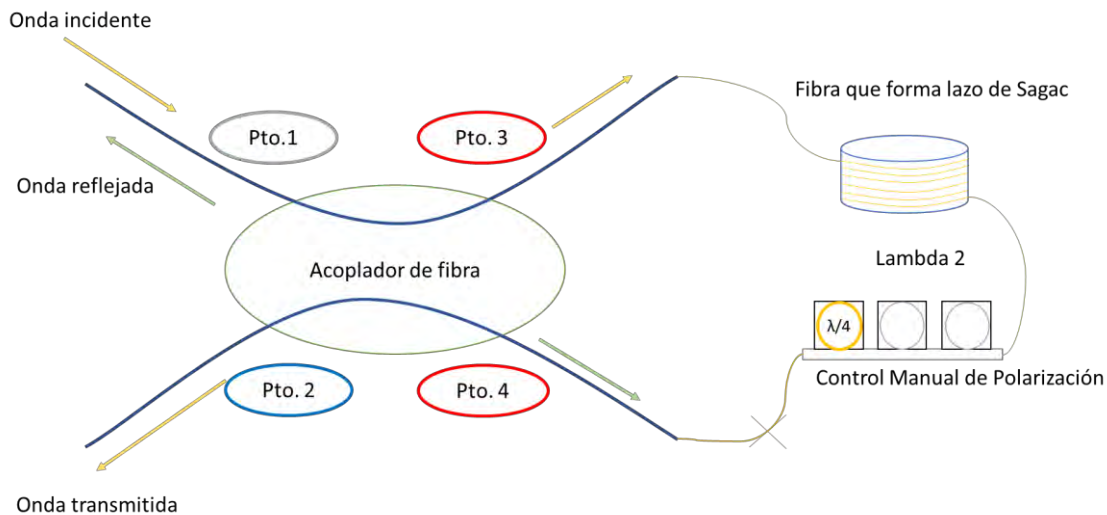


Figura 27. Esquema de trayectoria que recorre la luz

En la Figura 27 se muestra la implementación del interferómetro de Sagnac para el presente proyecto, como podemos observar cuando la luz incide por el puerto 1 el acoplador divide esta señal en dos campos de amplitud. Una de ellas continúa propagándose a través de la fibra por la que entró y el otro campo se transmite por la fibra del acoplador adquiriendo un cambio de fase de $\pi/2$. Las ondas de luz salen por el puerto 3 y 4, posteriormente entran a la fibra a través del lazo de Sagnac en direcciones opuestas.

Cuando las ondas de luz recorran la trayectoria cerrada del lazo de Sagnac, entrarán nuevamente al acoplador donde interferirán surgiendo dos señales de amplitudes.

En la Figura 27, la onda que incide en color amarillo entra al acoplador y surgen dos señales (señaladas por el color amarillo y verde), las cuales toman la trayectoria a través de los puertos 3 y 4 mediante la fibra óptica recorriendo el lazo de Sagnac. Después de recorrer la trayectoria, nuevamente entran al acoplador tomando el curso del puerto 3 al puerto 2 y del puerto 4 al puerto 1. La señal que elípticamente toma la trayectoria por el puerto 3 (color amarillo) toma el curso rumbo puerto de salida (puerto 2) donde puede ser analizado y la señal que toma el curso del puerto 4 (marcado con el color verde) se refleja por el puerto 1. Esta luz puede recorrer a través de la fibra de incidencia. Por lo que puede dañar al equipo que envía a onda de luz.

Para evitar que la luz viaje en contra propagación al sentido que lleva la onda inicial, se conectó un aislador óptico al puerto de incidencia (puerto 1).

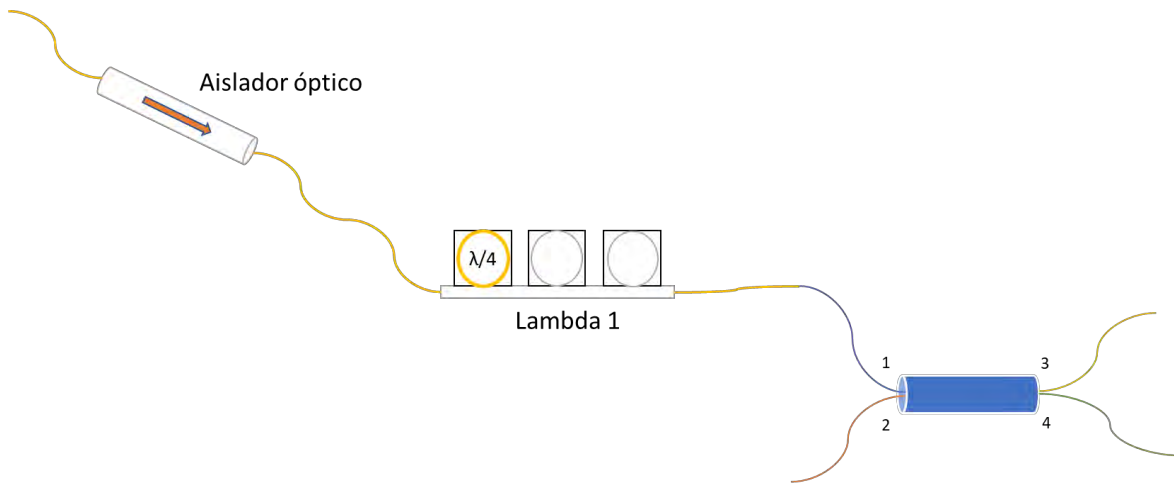


Figura 28. Conexión del aislador óptico y la lambda 1

El aislador óptico permite que la luz se transmita en una sola dirección, esto evita que cualquier luz que se refleja, entre a la fuente y cause problemas de retrodispersión y la retroalimentación.

El aislador se conectó entre la fuente de luz y una paleta del CMP en $\lambda/4$. De esta manera cuando la luz reflejante del interferómetro regrese a través de la fibra de entrada, esta se cancelará al llegar al aislador.

El retardador de $\lambda/4$ (lambda 1), nos permitirá controlar la posición gradual de la onda que incide al interferómetro y finalmente controlar la polarización de la luz mediante el retardador de $\lambda/4$ en el lazo de Sagnac (lambda 2).

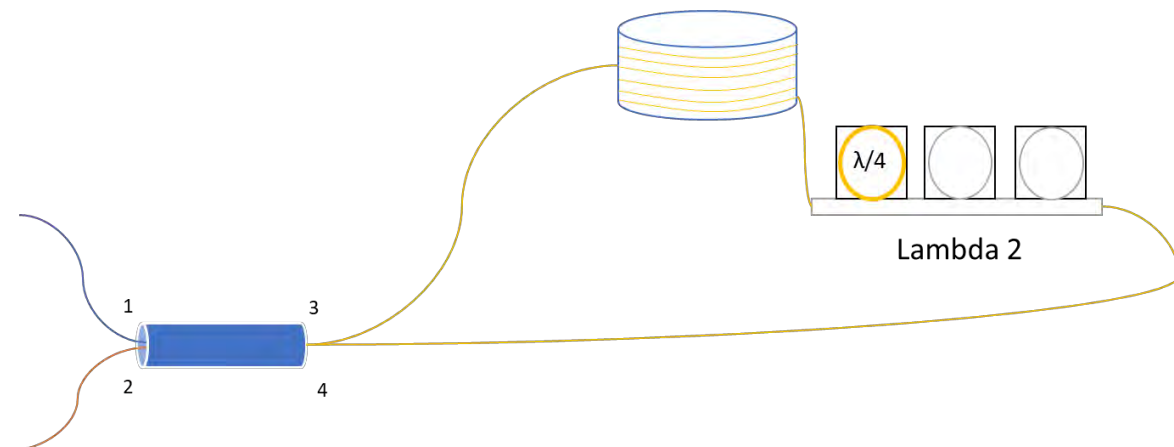


Figura 29. Control de polarización en el lazo de Sagnac

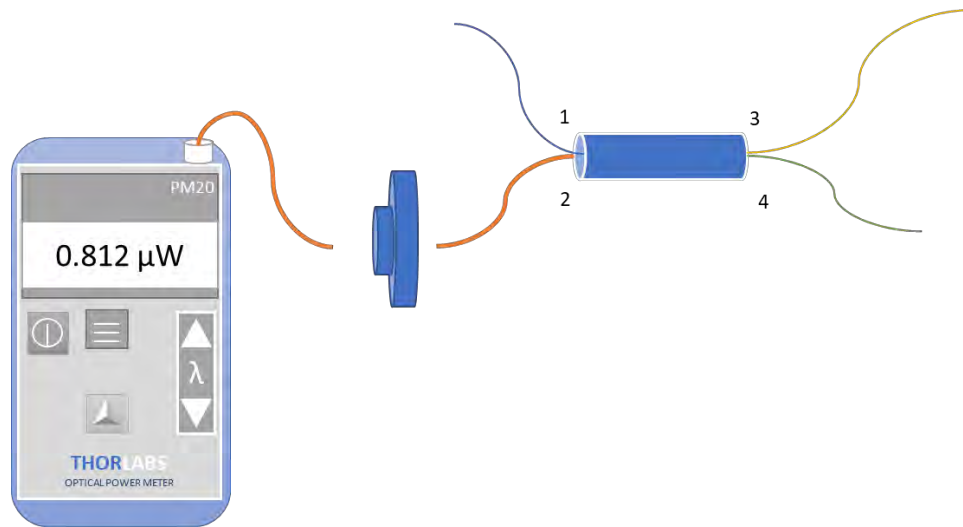


Figura 30. Lectura de la onda de salida del interferómetro de Sagnac

En el puerto 2, se obtiene la señal de salida del acoplador óptico. Esta señal se controla mediante el retardador de $\lambda/4$ que se encuentra entre la fibra conectada al puerto 3 y el interferómetro en el puerto 4. La señal de salida pasa por el polarizador y se mide con el potenciómetro tomando lectura de la potencia emitida y realizando los cálculos correspondientes con los parámetros de Stokes.

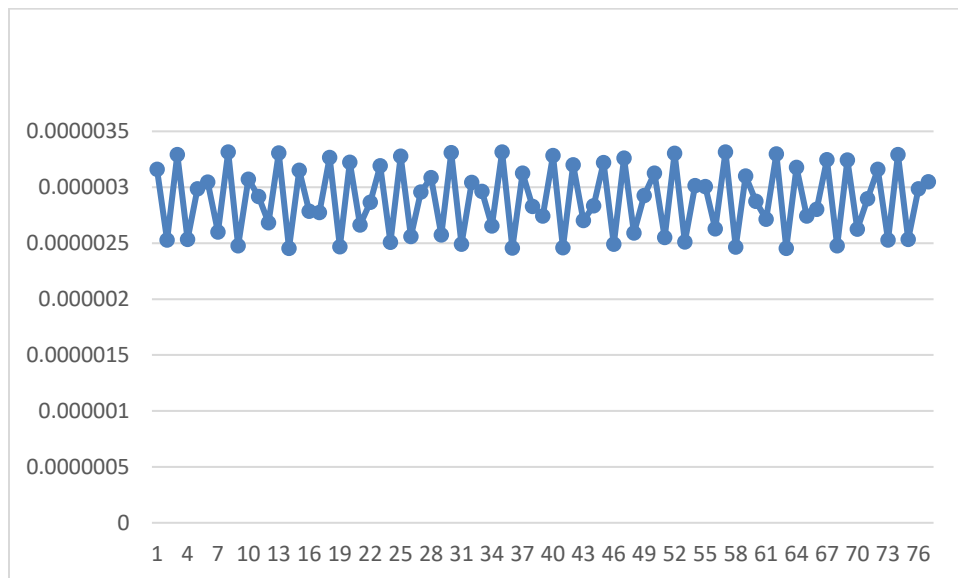
CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 5. Resultados

5.1 Determinación del estado de polarización en cada uno de los componentes del interferómetro de Sagnac

Pruebas con láser no polarizado

La luz natural es una mezcla de ondas aleatorias que se encuentran linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles. A este fenómeno se le conoce como luz no polarizada.



Gráfica 2. Luz no polarizada

$$S_0 = 5.769 \text{ w/m}^2 \quad S_0 / S_0 = 1$$

$$S_1 = 0.023 \text{ w/m}^2 \quad S_2 / S_0 = 0.003986826$$

$$S_2 = 0.16 \text{ w/m}^2 \quad S_3 / S_0 = 0.027734443$$

$$S_3 = 0.848 \text{ w/m}^2 \quad S_3 / S_0 = 0.146992546$$

Teniendo en cuenta el principio de Stokes

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \text{Luz no polarizada}$$

Tabla 14. Resultados de la matriz de Stokes

	Matriz	Resultado de la matriz
S0	$I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ)$	0.000005769
S1	$I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ)$	0.000000023
S2	$-I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) + 2I(45^\circ, 0^\circ)$	0.000000016
S3	$-I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) + 2I(45^\circ, 90^\circ)$	0.000000848

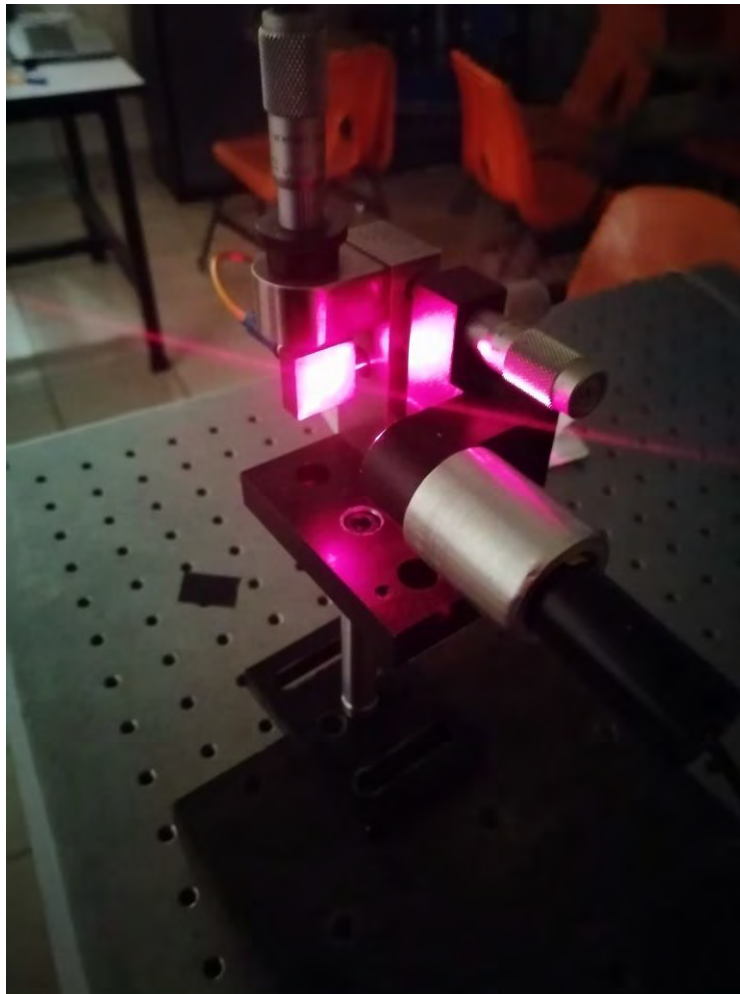


Figura 31. Láser de luz natural

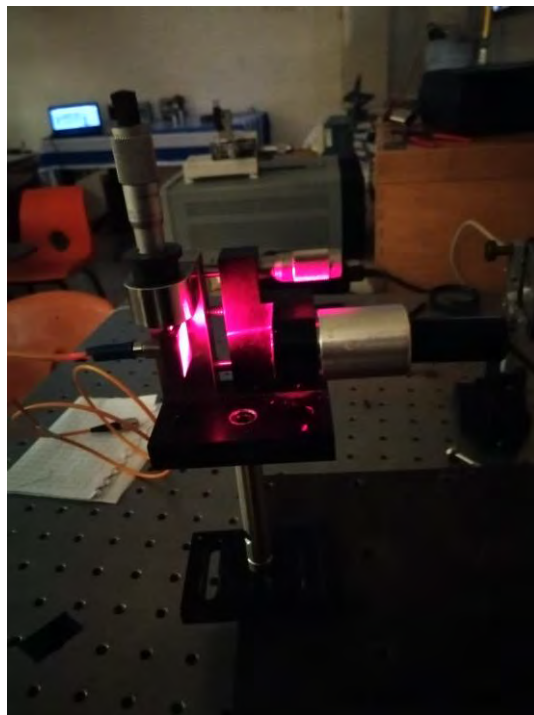


Figura 32. Prueba con láser de luz natural

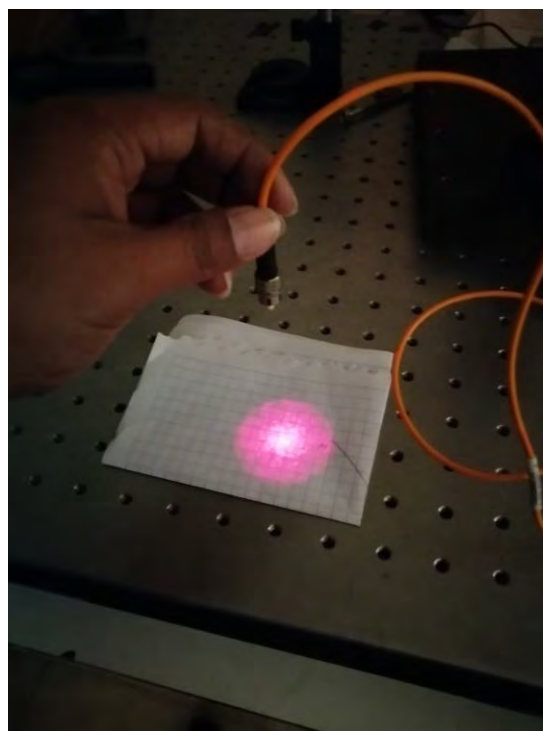


Figura 33. Luz no polarizada

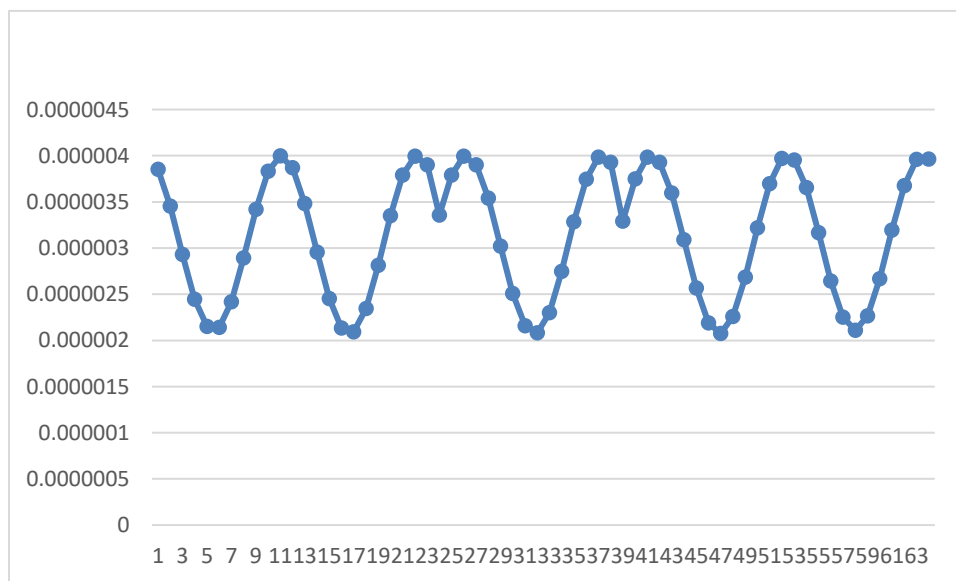
- Lambda 1: 45° con respecto al plano.
- Lambda 2: 3° a 0°.
- Polarizador: rotación en diferentes ángulos, con incremento de +3°.

Cuando se incide la luz linealmente polarizada a la fibra, esta se transmite a través del retardador de $\lambda/4$ (lambda 1) a 45°. Por lo que la luz que ingresa al puerto 1 del interferómetro, es una luz circularmente polarizada. Al pasar por el acoplador del interferómetro, la señal se divide. El 50 % pasa por el puerto 3 y el otro 50% pasa por el puerto 4 con una diferencia de fase de $\pi/2$. Cada uno de estas dos señales atravesaron el lazo de Sagnac.

Cabe mencionar que la diferencia de fase, únicamente suceden cuando se cruzan.

Después de atravesar el acoplador la polarización de la luz cambió a linealmente polarizada horizontalmente.

Cuando la luz que pasa por el puerto 3 pasa por el retardador de $\lambda/4$ (lambda 2) a 0° con respecto al eje del CMP, la polarización de la luz se mantiene, como si no fuese atravesado por un retardador. Finalmente, la luz que sale por el puerto 2, pasa por el polarizador. De esta manera se obtienen valores mínimos y máximos.



Gráfica 3. Luz linealmente polarizada horizontal



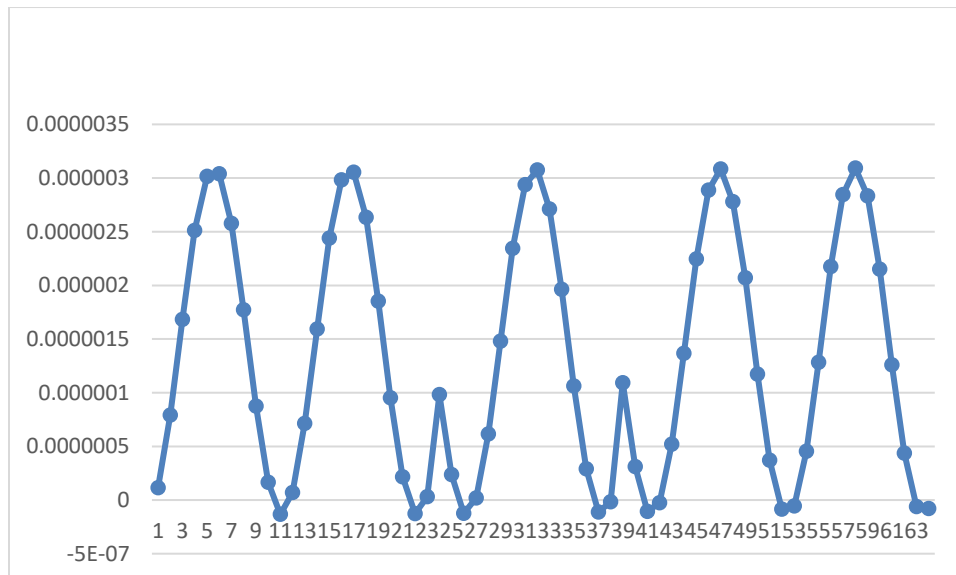
Figura 34. Implementación con el Controlador Manual de Polarización

Control manual de polarización, retardador de $\lambda/4$ (lambda 1) a 45° y retardador de $\lambda/4$ (lambda 2) a 0° .

- Lambda 1: 90°
- Lambda 2: 3° a 45°.
- Polarizador a 90°

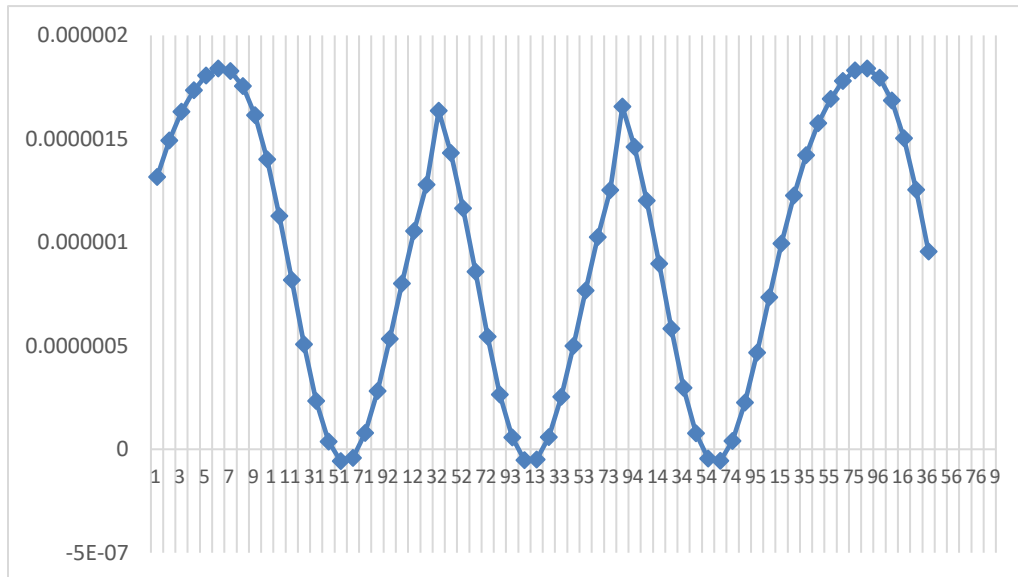
Cuando la luz ingresa a la fibra, es linealmente polarizada. Esta se transmite a través del retardador de $\lambda/4$ (la lambda 1) a 90°. Por lo que la luz que ingresa al puerto 1 del interferómetro, sigue siendo linealmente polarizada. Al pasar por el acoplador del interferómetro, la señal se divide con una diferencia de fase de $\pi/2$. Cada una de estas dos señales atravesaron el lazo de Sagnac, por el puerto 3 y 4 respectivamente.

Al pasar por una diferencia de fase, la polarización de la luz que se transmite por el lazo de Sagnac es una luz circularmente polarizada. Cuando la luz que pasa por el puerto 3 pasa por la lambda 2 a 45° con respecto al eje del CMP, la polarización de la luz se mantiene, como si no fuese atravesado por un retardador. Finalmente, la luz que sale por el puerto 2, pasa por el polarizador con su eje de transmisión a 90°, el cual permite que la luz se encuentre polarizada verticalmente.



Gráfica 4. Luz linealmente polarizada vertical

- Lambda 1: 0°
- Lambda 2: a 45° .



Gráfica 5. Polarización circular

La luz que incide a la fibra desde la fuente es linealmente polarizada, primero se transmite a través de la lambda 1 a 0° con respecto a la base del CMP para que la polarización se mantenga. Por lo que la luz que ingresa al puerto 1 del interferómetro, es una luz linealmente polarizada. Al pasar por el acoplador del interferómetro, la señal se divide con una diferencia de fase de $\pi/2$. Cada una de estas dos señales atravesaron el lazo de Sagnac, por el puerto 3 y 4 respectivamente.

Después de atravesar el acoplador la polarización de la luz cambió a circularmente polarizada.

Cuando la luz que pasa por el puerto 3 pasa por la lambda 2 a 45° con respecto al eje del CMP, la polarización de la luz se mantiene.

CAPÍTULO 6

CAPÍTULO 6. Conclusiones

Para determinar la polarización del haz de luz que emite el láser, se realizaron diferentes pruebas, tomando en cuenta los principios de la placa retardadora de $\lambda/4$.

Podemos decir que un haz de luz natural, al atravesar por un retardador de $\lambda/4$ sigue siendo luz natural.

Si una luz linealmente polarizada atraviesa por un retardador de $\lambda/4$ con su eje de transmisión a 45° , emergerá luz circularmente polarizada.

De esta manera, se conoció el estado de polarización del haz de luz que emite el láser y así mismo se pudo controlar el estado con ayuda del retardador de $\lambda/4$.

Cuando se implementó el interferómetro de Sagnac y enviamos las señales a través de la fibra, se pudo observar que la polarización que incidía a través del puerto de entrada era afectada al pasar por el acoplador del interferómetro, dando lugar a dos señales al 50 % cada una. De esta manera, al atravesar el lazo de Sagnac y el retardador de $\lambda/4$ fue posible controlar el estado de la polarización de salida.

Con ayuda de los parámetros de Stokes fue posible identificar el tipo de polarización del haz de luz en el puerto de salida del interferómetro.

Finalmente podemos decir que la retardadora de $\lambda/4$ nos permitió controlar el estado de polarización que índice y sale a través de los puertos del interferómetro de Sagnac.

Bibliografía

1. **Santa Cruz, Oscar.** Principios Generales de Fibra Óptica. 2008, pág. 12.
2. **Torres, Ceshia Kedusha Mendoza.** Caracterización del esparcimiento RAMAN estimulado en 25 km de fibra óptica SMF-28. 2018.
3. **Óptica, diseño de los cables de fibra.** Análisis para la aplicación del programa optifiber de optiwave para las mediciones de los parámetros de diseño de los cables de fibra óptica . 2014.
4. **Jiménez, Ing. Leopoldo Rene Villareal.** Sistemas de comunicación a través de fibras ópticas. San Nicolás de los Garza, N. L. : s.n., 1997.
5. **Zapardiel, Jaime Prieto.** Diseño de una red de acceso mediante fibra óptica. Madrid : s.n., 2014.
6. **S.A. Cotrino, J.D. Jimenez.** Análisis de funcionamiento de controlador manual de polarización . Colombia : s.n.
7. **Herrera, Ing. Marco Antonio Cortez.** Efecto de la anisotropía de la fibra dopada con erbio sobre la estabilidad espectral, en potencia y en polarización, de la emisión de una fuente superluminiscente de doble paso. Ensenada, Baja California, México : s.n., 2015.
8. **Huertas, Rafel, Valero, Eva y Beltrán, Antonio García.** Análisis del estado de polarización .
9. **D. Monzón, a.n. Starodumov, I.a. Zentenoa. Boyain y Goitia, e. de la Rosa.** Interferómetro de Sagnac con selectividad espectral.
10. **García, Andrés González.** Aplicaciones del Interferómetro de Sagnac de Fibra en Tecnología de Telecomunicaciones y para la Generación de Pulsos Ópticos Ultracortos.
11. **Ojeda, Lic. Nestor Eduardo Cruz.** Estudio de polarización vectorial. Tonantzintla, Puebla : s.n., Enero 2017.
12. **CORNING.** *Corning SMF-28 ULL Optical Fiber.*

13. **Cotrino, S.A. y J.D. Jimenez.** Análisis de funcionamiento de controlador manual de polarización. Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia : s.n.
14. **Rivas, Servando Barroso.** Caracterización polarimétrica de fibras monomodo. León, Gto : s.n., octubre 2013.
15. **Merenguel, Jose Darío Sarmiento.** Control de Polarización en Dispositivos Ópticos Integrados.
16. **L, Ariel Leiva, G., Marco Tarifeño y V., Ricardo Olivares.** Efectos de la dispersión por modo de la polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas.
17. **Ulaby, F.** Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo.
18. **G. Rodríguez Zurita, d. Acosta Avalos y j. Pedraza Contreras.** Parámetros de Stokes para haces reflejados y transmitidos en una frontera interdieléctrica: una práctica de laboratorio.
19. **Cabezas, Andres Felipe.** Sistema de comunicaciones ópticas.