



T E S I S

Como requisito para obtener el grado académico de

MAESTRÍA EN OPTOMECATRÓNICA

Tesis presentada por:

Ing. Servando Barroso Rivas

Con el tema:

Caracterización polarimétrica de fibras ópticas monomodo

Asesor de Tesis:

Dr. Rafael Espinosa Luna

León, Gto., octubre 2013

Dedicatoria

*Este trabajo se lo dedico a mi hijo Azael, que ha sido mi
inspiración para seguir adelante.*

*Le agradezco a mi esposa por apoyarme en los momentos difíciles
que hemos afrontado. Te amo Verónica*

*A mis padres, que aún habiendo malos entendidos, este logro fue
gracias a ellos.*

Y sin duda, agradezco al amado creador por todo.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que estuvieron a mí alrededor, como compañeros y amigos para poder finalizar este trabajo con éxito.

Agradezco a mi asesor Dr. Rafael Espinosa Luna, que debido a su gran apoyo incondicional, aportando mucho tiempo y conocimientos en este trabajo. Además nunca dejó de creer en mí para finalizarlo con éxito.

Agradezco al CONACYT, por otorgarme una beca, con la cual pude dar tranquilidad a mi familia y finalizar mi carrera.

Un enorme agradecimiento al equipo de trabajo del laboratorio GIPYS, M.C. Karla M. Salas Alcántara, M. Optomecatrónica Guadalupe López Morales y a M.C Izcoatl Saucedo Orozco por ayudarme en este proyecto y darme sus consejos.

Agradezco al Ing. Gerardo Gallo, por apoyarme y darme sus valiosos consejos.

Al Sr. Pedro Lombardo y familia, por creer en mí y darme sus bendiciones.

Al Ing. Vicente Robledo y TELMEX, por darme la oportunidad de hacer este trabajo.

Y sin olvidar, agradezco al Centro de Investigaciones en Óptica por prestarme sus instalaciones para poder realizar mi maestría, así como a todo el personal que labora en el centro de estudios. En particular, agradezco al Dr. Ismael Torres Gómez, por permitirme el acceso a su laboratorio, así como al Dr. Yuri Barmenkov, por permitirme utilizar su láser sintonizable.

Agradezco al Dr. Gelacio Atondo Rubio y Dr. Donato Luna Moreno, por apoyarme en la revisión y evaluación de este trabajo.

Y por todas aquellas personas que me brindaron su apoyo incondicional para cumplir mis objetivos.

Resumen

La comunicación a través de fibras ópticas es un área de interés particular para la empresa TELMEX. Esta empresa emplea fibras multimodales y monomodales en sus enlaces. Con el objetivo de obtener información sobre las polarizaciones más adecuadas para evitar la despolarización y mejorar la transmisión de información, se realizó una caracterización polarimétrica de las fibras ópticas monomodo que en TELMEX utilizan. Se determinó la matriz de Mueller de un conjunto de fibras y un empalme de fibra (tramos de 30, 100 y 200 cm), iluminada con luz láser de 1550 nm. Para su análisis, se empleó una serie de métricas polarimétricas, todas ellas a partir de la información generada por la matriz de Mueller. Los resultados muestran una congruencia entre sí, destacando pequeños efectos de despolarización y contribuciones a la polarizancia debidas a la iluminación con polarización circular. Se concluye que es necesario escalar tales estudios en enlaces comerciales, a fin de probar su eficacia.

Al conocimiento del tesista y de su asesor, este es el primer estudio formal asociado a iluminación polarizada que se reporta para TELMEX, quien hasta ahora no había trabajado con esta posibilidad, por lo que tiene una singular importancia el impacto que pudiera tener la incorporación de esta metodología en el ámbito comercial y laboral. El tesista trabaja en TELMEX.

Índice

Capítulo I	Introducción	
1.1	<i>Introducción.</i>	1
1.2	<i>Objetivo general.</i>	3
Capítulo II	Principios Teórico.	
2.1	<i>Óptica.</i>	4
2.2	<i>Propagación de las ondas electromagnéticas.</i>	4
2.3	<i>Ondas unidimensionales.</i>	5
2.4	<i>Ondas electromagnéticas.</i>	6
2.5	<i>Polarización de la luz.</i>	9
2.5.1	<i>Polarización lineal horizontal.</i>	10
2.5.2	<i>Polarización lineal vertical.</i>	11
2.5.3	<i>Polarización lineal $\alpha + 45^\circ$.</i>	11
2.5.4	<i>Polarización lineal $\alpha - 45^\circ$.</i>	11
2.5.5	<i>Polarización circular derecha.</i>	11
2.5.6	<i>Polarización circular izquierda.</i>	11
2.5.7	<i>Polarización elíptica.</i>	12
2.6	<i>Esfera de Poincaré.</i>	12
2.7	<i>Vectores de Stokes.</i>	14
2.8	<i>Matriz de Mueller.</i>	14
2.9	<i>Métricas escalares de polarización.</i>	15
2.10	<i>Fibras ópticas en comunicaciones.</i>	19
2.10.1	<i>Características</i>	19

2.10.2	<i>Elementos de enlace de comunicaciones con fibra óptica.</i>	21
2.10.3	<i>Reflexión y refracción.</i>	23
2.10.4	<i>Ángulo crítico y reflexión total.</i>	24
2.10.5	<i>Guiado de luz.</i>	24
2.10.6	<i>Apertura numérica.</i>	25
2.10.7	<i>Modos de propagación.</i>	25
2.10.8	<i>Degradación de la señal.</i>	27
2.10.9	<i>Factores que limitan la transmisión.</i>	28
2.11	<i>Tecnología en TELMEX en comunicación con fibras ópticas.</i>	29
Capítulo III	Pruebas y experimentos.	
3.1	<i>Arreglo experimental.</i>	31
3.1.1	<i>Emisor de luz láser sintonizable.</i>	32
3.1.2	<i>PSG, Generador de estados de polarización.</i>	33
3.1.3	<i>PSA, Sistema de análisis de estados de polarización.</i>	35
3.1.4	<i>Cortadora de fibra óptica y conectores FC.</i>	38
3.1.5	<i>Fibra óptica NZ-DSF G.655 (TELMEX).</i>	40
Capítulo IV	Resultados y conclusiones.	
4.1	<i>Resultados.</i>	48
4.2	<i>Conclusiones.</i>	59
4.3	<i>Trabajo a futuro.</i>	60
	<i>Bibliografía.</i>	61

Índice de Figuras

Capítulo II	Principios Teóricos.	
2.1	<i>Onda unidimensional .</i>	5
2.2	<i>Elipse de polarización .</i>	10
2.3	<i>Esfera de Poincaré.</i>	13
2.4	<i>Estructura de una fibra óptica.</i>	20
2.5	<i>Tipos de fibra usadas por TELMEX</i>	21
2.6	<i>Esquema de un sistema de comunicación óptica.</i>	22
2.7	<i>Esquema de los elementos auxiliares de la fibra.</i>	23
2.8	<i>Reflexión y refracción, ley de Snell.</i>	23
2.9	<i>Apertura numérica.</i>	25
2.10	<i>Modos de propagación.</i>	27
Capítulo III	Pruebas y experimentos.	
3.1	<i>Sistema general de prueba.</i>	32
3.2	<i>Láser sintonizable (1550nm).</i>	33
3.3	<i>Controlador generador de estados de polarización DPC5500.</i>	34
3.4	<i>Interfaz gráfica del controlador generador de estados de polarización DPC5500.</i>	34
3.5	<i>Cabeza PAN7510IR3con sensor en el rango 1300-700nm, IR3.</i>	35
3.6	<i>Parte izquierda: PAX5710 conectado al PAN5710 IR3,</i> <i>Parte derecha: TXP5004 interfaz conectada a PC.</i>	36
3.7	<i>Interfaz gráfica del analizador.</i>	37
3.8	<i>Peladora ajustable para cubiertas de fibras.</i>	38
3.9	<i>Cortadora de fibra marca Fitel/Furukawa.</i>	39

3.10	<i>Conectores FC con acopladores marca Bullet.</i>	39
3.11	<i>Estructura de fibra óptica monomodo marca Condumex.</i>	42
3.12	<i>Foto microscópica de la sección transversal de fibra G.655.</i>	42
3.13	<i>Arreglo experimental.</i>	43
3.14	<i>Empalmadora FastCast splicer.</i>	44
3.15	<i>Corte de fibra.</i>	44
3.16	<i>Colocación de la fibra y pre visualización de puntas de fibra.</i>	45
3.17	<i>Momento de la fusión.</i>	45
3.18	<i>Fibra ya fusionada con su pérdida estimada (0.02 dB).</i>	46
3.19	<i>Calentador para ajustar la manga al empalme.</i>	46
3.20	<i>Empalme finalizado.</i>	47
3.21	<i>Conector mecánico tipo FC.</i>	47
Capítulo IV	Resultados y conclusiones.	
4.1	<i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con la fibra óptica con cubierta roja, acimut igual a 0°.</i>	50
4.2	<i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con la fibra óptica con cubierta roja de 1 m.</i>	52
4.3	<i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con la fibra óptica con cubierta transparente de 1m.</i>	53
4.4	<i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con la fibra óptica con cubierta verde de 1 m.</i>	54
4.5	<i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con la fibra óptica con cubierta azul de 2 m.</i>	55
4.6	<i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con</i>	

<i>la fibra óptica con cubierta azul de 2 m. Tramo A.</i>	56
4.7 <i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con la fibra óptica con cubierta azul de 2 m. Tramo B.</i>	56
4.8 <i>Gráficas descriptivas de la interacción de luz polarizada con la fibra óptica con cubierta azul de 2 m. Empalme (0.02 dB).</i>	57

Índice de Tablas

Capítulo III	Pruebas y experimentos.	
3.1	<i>Parámetros Ópticos.</i>	41
3.2	<i>Parámetros Geométricos.</i>	41
3.3	<i>Parámetros Mecánicos y ambientales.</i>	41
Capítulo IV	Resultados y conclusiones.	
4.1	<i>Métricas obtenidas. Fibra roja 1, longitud de 30 cm.</i>	49
4.2	<i>Métricas obtenidas. Fibra roja 1 m.</i>	52
4.3	<i>Métricas obtenidas. Fibra transparente 1 m.</i>	52
4.4	<i>Métricas obtenidas. Fibra verde 1 m.</i>	53
4.5	<i>Métricas obtenidas. Fibra azul 2 m.</i>	54
4.6	<i>Métricas obtenidas. Fibra corte 1 m tramo A.</i>	55
4.7	<i>Métricas obtenidas. Fibra corte 1 m tramo B.</i>	56
4.8	<i>Métricas obtenidas. Fibra con empalme.</i>	57

Capítulo I. Introducción

Actualmente, las comunicaciones en el país se realizan de manera segura y eficiente por medio de fibras ópticas. Telmex es la empresa más importante en México y en América Latina en telecomunicaciones, la cual tiene una red muy grande compuesta por fibras ópticas distribuidas sobre toda la extensión territorial, con equipos sofisticados ubicados en ciudades importantes para la transmisión y recepción de datos a lo largo de la red.

Una fibra óptica es un conductor óptico filiforme, extremadamente delgado, a través del cual se propaga luz y no señales eléctricas, con lo que se elimina la problemática de interferencias eléctricas.

Con la invención de la fibra óptica, actualmente los enlaces de comunicaciones han crecido de forma acelerada, todo ello debido a la rapidez, cantidad y calidad de la transmisión que son capaces de ofrecer. Es importante mencionar, que así como existen tantas ventajas en este tipo de transmisiones, no está exenta de tener desventajas; entre ellas, el alto costo de la fibra y del equipo que realiza el envío y recepción de la información. Otra desventaja importante, es la degradación que una señal óptica sufre a lo largo de un enlace de gran distancia.

Los parámetros que tienen importancia en telecomunicaciones por fibra óptica, son las pérdidas dependientes de la polarización (polarization dependent loss, PDL), el grado de polarización, la atenuación, pérdidas por absorción, pérdida de Rayleigh, dispersión cromática, pérdidas por radiación, dispersión modal y pérdidas por acoplamiento. Se ha reportado que la determinación de la respuesta lineal de una fibra óptica a la polarización incidente, mediante la determinación de su matriz de Mueller, brinda información complementaria a la usualmente reportada en su caracterización, donde utilizan solo luz linealmente polarizada [1]. Es por ello, que con la caracterización polarimétrica se pretende dar una solución para minimizar la degradación de la señal, al conocer las condiciones en la que su rendimiento es el máximo posible.

Su uso es muy variado: desde comunicaciones digitales y joyas, pasando por sensores y llegando a usos decorativos, como árboles de Navidad, veladoras y otros elementos similares. Aplicaciones de la fibra monomodo: cables submarinos, cables interurbanos, etc. La fibra óptica se emplea como medio de transmisión para las redes de telecomunicaciones, ya que por su flexibilidad los conductores ópticos pueden agruparse formando cables. Las fibras usadas en este campo son

de plástico o de vidrio, y algunas veces de los dos tipos. Para usos interurbanos son de vidrio, por la baja atenuación que tienen.

Los cables de fibra óptica proporcionan una alternativa sobre los coaxiales en la industria de la electrónica y las telecomunicaciones. Así, un cable con 8 fibras ópticas tiene un tamaño bastante más pequeño que los utilizados habitualmente, puede soportar las mismas comunicaciones que 60 cables de 1623 pares de cobre o 4 cables coaxiales de 8 tubos, todo ello con una distancia entre repetidores mucho mayor.

Por otro lado, el peso del cable de fibra óptica es muchísimo menor que el de los coaxiales, ya que una bobina del cable de 8 fibras antes citado puede pesar del orden de 30 kg/km, lo que permite efectuar tendidos de 2 a 4 km de una sola vez, mientras que en el caso de los cables de cobre no son prácticas distancias superiores a 250 - 300 m.

La “fibra óptica” no se suele emplear tal y como se obtiene tras su proceso de creación (tan sólo con el revestimiento primario), sino que hay que dotarla de más elementos de refuerzo que permitan su instalación sin poner en riesgo al vidrio que la conforma. Es un proceso difícil de llevar a cabo, ya que el vidrio es quebradizo y poco dúctil. Además, la sección transversal de la fibra es muy pequeña, por lo que la resistencia que ofrece a romperse es prácticamente nula. Es por tanto necesario protegerla mediante la estructura que denominamos cable.

Una fibra monomodo es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño (8,3 a 10 micrones) que sólo permite un modo de propagación. Su transmisión es paralela al eje de la fibra. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias (hasta 400 km máximo, mediante un láser de alta intensidad) y transmitir elevadas tasas de información (decenas de Gbit/s).

Una fibra multimodo es aquella en la que los haces de luz pueden transmitirse por más de un modo o camino. Esto supone que no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 2 km, es simple de diseñar y económico.

El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido al gran tamaño

del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Conociendo el interés que representa para la empresa TELMEX el estudio polarimétrico de las fibras monomodo que utiliza para enlaces nacionales de larga distancia y considerando que estos resultados pueden impactar en la mejora del manejo de datos, se ha tenido como objetivo central del presente trabajo de tesis la realización de una caracterización polarimétrica de éste tipo de fibras, centrada en 1550 nm. Este trabajo se desarrolla de la siguiente manera, en el Capítulo II, se detalla la parte teórica en la cual está basado este estudio polarimétrico. Además se presenta una breve introducción a los detalles generales del medio a estudiar, la fibra óptica monomodo.

En el Capítulo III, se presenta el arreglo experimental utilizado para la caracterización polarimétrica, así como la descripción general de cada elemento que lo compone.

En el Capítulo IV, se reportan los resultados y las conclusiones obtenidas. Todas las gráficas descriptivas que proporcionan el comportamiento polarimétrico para cada estado de polarización incidente. Además, se muestran las tablas de las métricas de despolarización escalares que detallan a la fibra óptica. En el mismo Capítulo IV, se analizan los resultados y se concluye de forma general su comportamiento polarimétrico.

1.2 **Objetivo General.**

Se realizará una caracterización polarimétrica de las fibras ópticas que TELMEX utiliza en las redes de telecomunicaciones federales del país, donde se obtendrá información sobre qué polarizaciones son las adecuadas para que la transmisión resulte menos inmune a la despolarización. Se buscará identificar si la atenuación, debido a la dispersión y atenuación que sufre un haz de luz a lo largo de un enlace óptico, es un factor que pueda controlarse con el uso de algún estado de polarización. El objetivo final, es hacer de este desarrollo de tesis una herramienta de trabajo que pudiera tener un impacto real en la mejora en las comunicaciones de la empresa TELMEX.

La caracterización se describirá de forma general para el tipo de fibra que está bajo estudio, considerando condiciones óptimas y controladas, descartando los factores externos que pueden afectar un enlace óptico.

Capítulo II. Principios Teóricos

2.1. *Óptica.*

La óptica es una rama de la física que estudia el comportamiento de la propagación de la luz y su interacción con medios materiales. Como la luz es una onda electromagnética, es necesario conocer sus características propias. La óptica comprende el estudio de la refracción, reflexión, interferencia, difracción, formación de imágenes y la interacción de la radiación electromagnética con la materia, entre muchos otros fenómenos [2].

Una radiación electromagnética es una combinación de campos magnéticos y campos eléctricos que oscilan y se propagan formando un solo ente, transportando energía. Esta puede manifestarse de varias formas, tales como calor radiado, luz visible, rayos X o rayos Gamma.

La luz es parte de la radiación electromagnética y el color que se manifiesta en los objetos que ilumina es debido a la respuesta con que éstos responden a tales estímulos. La materia puede presentar absorción selectiva, fosforescencia, fluorescencia, dispersión, esparcimiento, entre otros muchos mecanismos internos posibles, dependiendo de su propia naturaleza y de las características asociadas a la iluminación, como longitud de onda, frecuencia e intensidad.

2.2. *Propagación de las ondas electromagnéticas.*

Las ondas de luz se propagan a través del vacío en su trayecto desde los cuerpos celestes a la Tierra. También la propagación se puede generar en un medio material, el cual genera dispersión y esparcimiento y además tiene la capacidad de alterar sus propiedades. Esto debido a la existencia de partículas que interactúan y modifican su propagación, siendo el color de la atmósfera terrestre una de las manifestaciones más comunes. En algunos casos puede provocar rompimiento molecular, como ocurre con la piel humana bajo iluminación con luz ultravioleta. Las ondas electromagnéticas tienen un pequeño rango de visibilidad para el ojo humano, que es capaz de distinguir entre 380-780 nm, por lo que este intervalo de longitudes de onda se le conoce como espectro visible.

Para describir el comportamiento de la luz como onda, se inicia describiendo matemáticamente una de sus formas más simples, la onda unidimensional de luz monocromática.

2.3. **Ondas unidimensionales.**

La propagación de la luz en un medio puede representarse como una onda unidimensional, donde su forma base está definida por la ecuación 2.1:

$$\varphi = A \text{sen}(Kz) \quad (2.1)$$

Donde A es la amplitud de la onda, z la posición a lo largo de su propagación y K es el número de onda de propagación de onda, definido por la ecuación 2.2a [2]

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2a)$$

Donde λ es la longitud de onda.

Cuando la onda unidimensional viaja a una velocidad s en el medio de propagación, la ecuación 2.1 debe adecuarse para poder representar dicho comportamiento en función del tiempo de propagación, tomando la forma dada por la ecuación 2.2b

$$y = A \text{sen}K(z - st) \quad (2.2b)$$

Donde las literales A , K y z expresan lo mismo que en la ecuación 2.1. La variante st es la distancia que recorre la onda unidimensional a lo largo de z a una velocidad s en un tiempo t . Una característica muy particular e importante de una onda unidimensional es la longitud de onda λ , la cual se describe en la figura 2.1. y describe la longitud total de la onda característica.

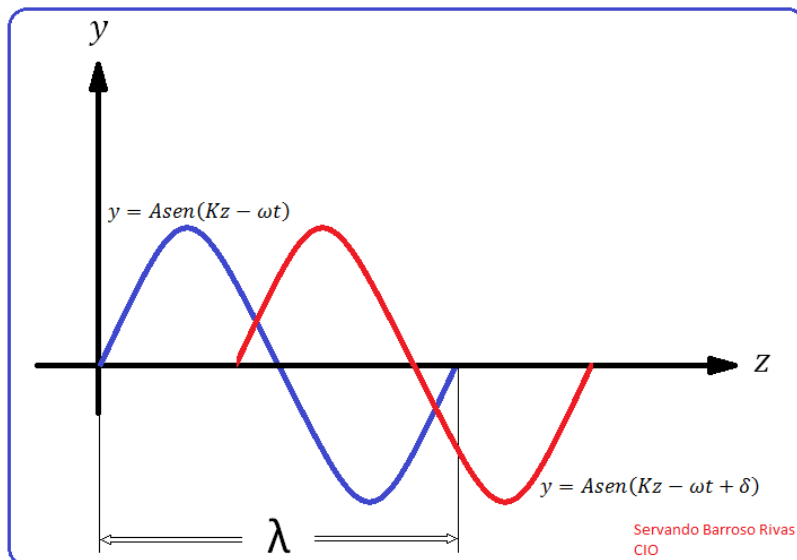


FIG. 2.1 ONDA UNIDIMENSIONAL

La longitud λ está representada por la ecuación 2.3, donde τ es un periodo temporal.

$$\tau = \frac{\lambda}{s} \quad (2.3)$$

El periodo temporal tiene relación con la frecuencia que tiene la onda unidimensional, esto se muestra en la ecuación 2.4

$$\nu = \frac{1}{\tau} \quad (2.4)$$

También existe la frecuencia angular ω que es muy importante mencionarla y se representa por la ecuación 2.5

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi\nu \quad (2.5)$$

Usando las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5, se puede reescribir la ecuación 2.1 como

$$y = A \sin(Kz - \omega t) \quad (2.6)$$

La ecuación anterior es la representación de una onda donde no se considera una constante de fase inicial, por lo que en la ecuación 2.7 se expresa una ecuación de forma más general para la onda unidimensional, con constante fase inicial δ .

$$y = A \sin(Kz - \omega t + \delta) \quad (2.7)$$

Dependiendo del valor inicial de δ , la función puede convertirse en una onda senoidal o cosenoidal ($\delta = \pi/2$).

2.4. **Ondas electromagnéticas.**

Las ecuaciones de Maxwell son el conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales (también se pueden escribir de forma integral) que describen todos los fenómenos electromagnéticos que pueden ocurrir en todo el universo (hasta donde se tiene información) [3]. Esta contribución se debe a James Clerk Maxwell, al haber reunido en estas ecuaciones resultados experimentales obtenidos durante muchos años atrás por Coulomb, Gauss, Ampere y Faraday entre otros. En el vacío, las ecuaciones están expresadas por

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Ley de Gauss}) \quad (2.8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Ley de Gauss del Campo Magnético)} \quad (2.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ (Ley de Faraday)} \quad (2.10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \text{ (Ley de Ampere-Maxwell)} \quad (2.11)$$

De donde ϵ_0 es la permitividad en el vacío con un valor de $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, de $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, ρ es la densidad de carga en el vacío, \vec{E} es el campo eléctrico, \vec{B} es la densidad del campo magnético o inducción magnética y \vec{J} es la densidad de corriente eléctrica.

Maxwell descubrió que la luz era una radiación electromagnética y que su velocidad estaba dada por una relación entre la permitividad y la permeabilidad magnética,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.99792458 \times 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2.12)$$

Con estas ecuaciones y bajo ciertas condiciones del medio se obtienen las ecuaciones de onda que describen el movimiento ondulatorio de la luz, con las cuales se partirá para la explicación de la polarización de la luz.

Las ecuaciones de onda para los campos eléctrico y magnético en el vacío, se muestran en la ecuación 2.13.

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad \nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.13)$$

La solución a este par de ecuaciones diferenciales de segundo grado, tiene la misma forma para ambos campos, ya que estos son ortogonales entre sí y también son ortogonales con respecto al vector z de propagación de la onda. Por lo tanto se obtiene que la función de onda para el campo eléctrico tiene la forma:

$$E = E_0 e^{i(\omega t - Kz + \delta)} \quad (2.14)$$

Para el campo magnético la solución es del mismo tipo exponencial. Estas expresiones pueden descomponerse en sus partes real e imaginaria, empleando la fórmula de Euler $[e^{ix} = \cos x + i \sin x]$. La función que se analiza en este trabajo es solo la parte real, pues es la que tiene el sentido físico de la solución compleja. Debido a esto, la ecuación 2.14 se puede modificar para que se represente la solución en sentido físico, de la siguiente manera

$$E = E_0 \cos(\omega t - Kz + \delta) \quad (2.15)$$

En el vacío o en medios homogéneos e isotrópicos, el campo eléctrico E tiene siempre una dirección ortogonal a la propagación de la onda, por lo que la ecuación 2.15 tiene dos componentes ortogonales entre sí, las cuales se describen en las ecuaciones 2.16 y 2.17 [4].

$$E_x(z, t) = E_{0x}(t) \cos[\omega t - Kz + \delta_x(t)] \quad (2.16)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y}(t) \cos[\omega t - Kz + \delta_y(t)] \quad (2.17)$$

Los valores E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes máximas de cada componente, mientras que δ_x y δ_y son las fases iniciales.

Utilizando un sistema de referencia apropiado, la polarización de la luz se puede describir en función de sus componentes ortogonales, como la suma vectorial de las mismas. Así pues, con las ecuaciones 2.16 y 2.17 se describe la propagación de ambas componentes y dependiendo de su fase y su amplitud, el vector \vec{E} resultante puede variar su dirección y por consiguiente cambia la polarización de la luz a lo largo de su camino.

Antes de entrar a fondo con los diferentes tipos de polarización y los parámetros característicos para cada tipo, se definirán algunos otros conceptos que son importantes de mencionar.

El índice de refracción n en un medio es la relación que existe entre la velocidad de la luz en el vacío c y la velocidad de la luz en el medio v [4], la ecuación 2.18 define dicha relación

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.18)$$

Matemáticamente se puede apreciar que en medios donde el índice de refracción es más alto, la velocidad de la luz en dicho medio es más lenta. Para medios transparentes; es decir, donde no existe absorción de la energía de la luz, el índice de refracción es el expresado por la ecuación 2.18, que corresponde a un valor real. También existen medios donde la luz es absorbida por las partículas, moléculas o átomos que la componen, y conlleva a que el índice de refracción se describe como un número complejo, ya que se agrega información asociada a la absorción a través de la parte imaginaria del índice de refracción, llamado coeficiente de extinción k [4], Entonces el índice de refracción complejo queda expresado como:

$$N = n - ik \quad (2.19)$$

Introduciendo este valor en la función de onda de la ecuación 2.14, donde el valor que toma el número de propagación K , es

$$K = \frac{2\pi n}{\lambda} = \frac{2\pi N}{\lambda} = \frac{2\pi(n-ik)}{\lambda} \quad (2.20)$$

Se obtiene la siguiente expresión

$$E = E_0 \left(e^{-\frac{2\pi k}{\lambda} z} \right) e^{i(\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda} z + \delta)} \quad (2.21)$$

Donde el primer término exponencial, dentro del paréntesis, genera una atenuación en la amplitud de la onda a lo largo de la propagación; es decir, indica que existe absorción y que ésta aumenta a medida que penetra en el medio.

2.5. **Polarización de la Luz.**

Cuando el campo eléctrico asociado a las ondas electromagnéticas se mantiene oscilando en un plano fijo mientras se propaga, se dice que la luz está polarizada linealmente. Esto fue descubierto experimentalmente por E. L. Malus, así como también por Christian Huygens y Jean Baptiste Biot. Sus estudios han aportado conceptos asociados a la respuesta lineal a la intensidad asociada a luz polarizada, que han ayudado a describir las características de materiales y superficies.

La orientación del plano de oscilación del campo eléctrico puede ocurrir de varias maneras bien definidas, como la de mantenerse fijo en cualquier orientación angular respecto a un plano perpendicular a la dirección en que se propaga, o bien realizar un giro cada periodo, a la izquierda o a la derecha, respecto de un observador ubicado en la dirección de propagación. La forma más general que existe es la polarización elíptica, que a continuación se describe con sus expresiones correspondientes [5].

Utilizando las ecuaciones 2.16 y 2.17 se puede describir la polarización elíptica, mediante las ecuaciones 2.22 y 2.23 y considerando en éstas la sustitución de la variable $\tau = \omega t - Kz$, para reducir términos en el desarrollo [3].

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \sin \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \sin \delta_x = \cos \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (2.22)$$

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta_x = \sin \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (2.23)$$

Operando con estas dos ecuaciones se obtiene la ecuación de una elipse; llamada **Elipse de Polarización**, que está descrita por la ecuación 2.24, donde $\delta = \delta_y - \delta_x$ [6].

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2.24)$$

En la figura 2.2 [3], se muestra la elipse de polarización generada durante un periodo, mientras se observa en un plano fijo, perpendicular a la dirección de propagación.

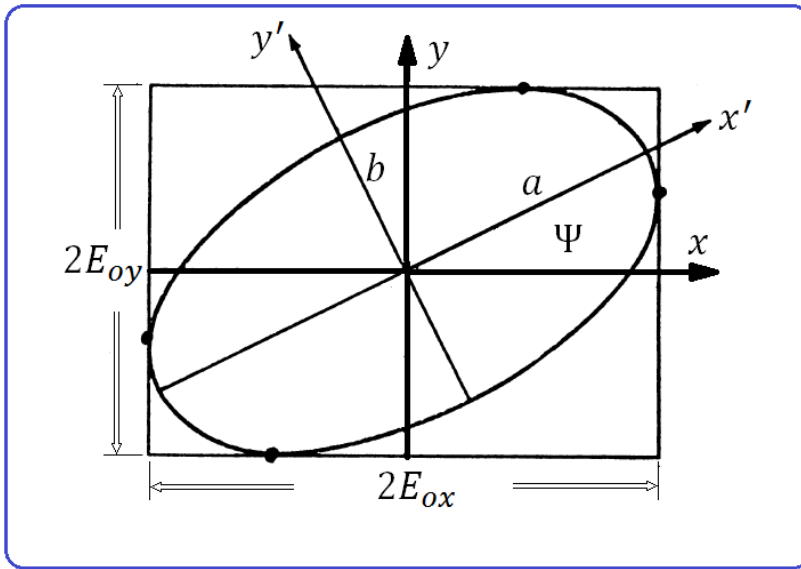


FIG. 2.2. ELIPSE DE POLARIZACIÓN

Con la ecuación 2.24 se pueden encontrar todos los tipos existentes de polarización total. Para el estudio en este trabajo se toman en cuenta los 6 estados de polarización básicos, los cuales dependen de los valores de los parámetros físicos asociados a las literales de la ecuación 2.23 [3].

2.5.1. Polarización Lineal Horizontal.

Para este tipo de polarización las fases y magnitudes deben cumplir la siguiente relación.

- Diferencia de fase $\delta_y - \delta_x = 0$
- La magnitud $E_y = 0$ y $E_x \neq 0$

2.5.2. **Polarización Lineal Vertical.**

Para este tipo de polarización las fases y magnitudes deben cumplir la siguiente relación.

- Diferencia de fase $\delta_y - \delta_x = 0$
- La magnitud $E_x = 0$ y $E_y \neq 0$

2.5.3. **Polarización Lineal a +45°.**

Para este tipo de polarización las diferentes variables cumplen con las relaciones siguientes.

- Diferencia de fase $\delta_y - \delta_x = 0$
- La magnitud $E_y = E_x$

2.5.4. **Polarización Lineal a -45°.**

Para este tipo de polarización las diferentes variables deben cumplir la siguiente relación.

- Diferencia de fase $\delta_y - \delta_x = \pi$
- La magnitud $E_y = -E_x$

2.5.5. **Polarización Circular Derecha.**

En este caso, los parámetros que la definen son:

- Diferencia de fase $\delta_y - \delta_x = \frac{\pi}{2}$
- La magnitud $E_y = E_x$

2.5.6. **Polarización Circular Izquierda.**

En este caso, los parámetros requeridos son:

- Diferencia de fase $\delta_y - \delta_x = \frac{3\pi}{2}$
- La magnitud $E_y = E_x$

Es necesario considerar que ésta descripción de la polarización es válida observando hacia la fuente; es decir, hacia donde proviene la luz.

2.5.7. *Polarización elíptica.*

Como ya se había mencionado, el estado más general es la polarización elíptica. Existen otras variables importantes para el análisis de la elipse de polarización, entre las cuales están la longitud de los semiejes y el ángulo acimutal Ψ , que se forma entre el eje mayor de la elipse y el eje x de referencia. Este ángulo de rotación de la elipse está definido en función de las componentes ortogonales del campo eléctrico, mediante la ecuación 2.25

$$\tan \Psi = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (2.25)$$

También es importante saber el sentido en que gira la elipse de polarización conforme se propaga, y esto depende de la relación de fases entre las dos componentes.

- Dextrógira si, $0 < \delta < \pi$
- Levógira si, $\pi < \delta < 2\pi$

El ángulo de elipticidad χ es un término auxiliar que también se utiliza como una opción para la representación del estado de polarización. Se define como

$$\tan \chi = \pm \frac{a}{b} \quad (2.26)$$

2.6. *Esfera de Poincaré.*

La esfera de Poincaré es un lugar geométrico en 3D, donde todos los estados de polarización pueden ser representados en ella. En la figura 2.3 se muestra la esfera y los diferentes ángulos que describen la posición de un estado de polarización cualquiera [7].

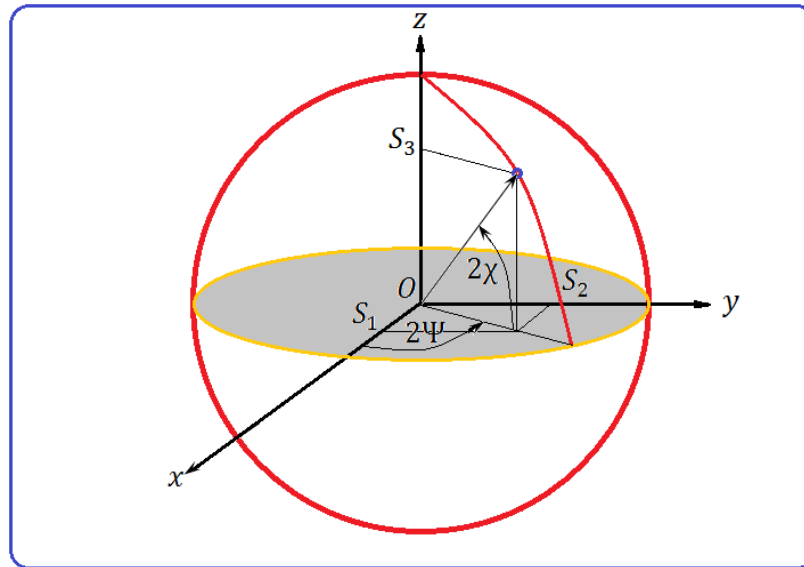


FIG. 2.3. ESFERA DE POINCARÉ

Los 6 estados básicos de polarización anteriormente expuestos, se pueden representar en ciertas posiciones sobre la superficie de la Esfera de Poincaré (Fig. 2.3). De manera general se pueden identificar familias completas de estados de polarización que comparten características comunes, como las siguientes

- Para $\chi > 0$. Estados de polarización elíptica dextrógira ($0 < 2\chi \leq \pi/2$).
- Para $\chi < 0$. Estados de polarización elíptica levógira. ($-\pi/2 \leq 2\chi \leq 0$)
- Puntos sobre el ecuador ($0 \leq 2\psi \leq 2\pi$) y $\chi = 0$. Estos son estados de polarización lineal. En la parte positiva del eje X, polarización horizontal y en la parte negativa el eje X, polarización vertical. En la parte positiva del eje Y, polarización lineal a $+45^\circ$ y en la parte negativa el eje Y, polarización lineal a -45° .
- Cuando $\chi = \pi/4$, los puntos se ubican sobre los polos de la esfera, el superior representa polarización circular derecha o dextrógira y el inferior polarización circular izquierda o levógira.
- Puntos en el mismo meridiano $\psi = cte$ representan estados de polarización tales que sus elipses de polarización tienen la misma orientación. Mientras que puntos en el mismo paralelo $\chi = cte$, representan estados de polarización tales que sus elipses de polarización tienen la misma elipticidad.
- Los puntos que se encuentran sobre la superficie de la esfera, representan estados totalmente polarizados, mientras que los que se ubican dentro de la esfera, son estados parcialmente polarizados. En el centro de la esfera se

representa la luz no polarizada. Los puntos fuera de la superficie, carecen de sentido físico.

2.7. **Vectores de Stokes.**

Los vectores de Stokes, es un conjunto de 4 elementos S_1, S_2, S_3, S_4 , los cuales son valores reales y son llamados parámetros de Stokes, acorde a la ecuación 2.27a. Los vectores representan cualquier estado de polarización posible (totalmente polarizado, parcialmente polarizado o no-polarizado):

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.27a)$$

Otra forma de representar los vectores de Stokes, es en función de las amplitudes ortogonales del campo eléctrico E_p, E_s definidos en la ecuación 2.27b.

$$S = \begin{pmatrix} \langle E_p E_p^* \rangle + \langle E_s E_s^* \rangle \\ \langle E_p E_p^* \rangle - \langle E_s E_s^* \rangle \\ \langle E_p E_s^* \rangle + \langle E_s E_p^* \rangle \\ j(\langle E_p E_s^* \rangle - \langle E_s E_p^* \rangle) \end{pmatrix} \quad (2.27b)$$

Los vectores de Stokes usualmente se normalizan respecto a la unidad, para facilitar su identificación, esto se logra dividiendo todos los parámetros por S_0 [3].

Los parámetros de Stokes pueden obtenerse mediante el acimut y la elipticidad, como se muestran en las ecuaciones 2.28, 2.29 y 2.30

$$S_1 = S_0(DoP) \cos 2\chi \cos 2\Psi \quad (2.28)$$

$$S_2 = S_0(DoP) \cos 2\chi \sin 2\Psi \quad (2.29)$$

$$S_3 = S_0(DoP) \sin 2\chi \quad (2.30)$$

Donde DoP representa el grado de polarización, ecuación 2.34.

2.8. **Matriz de Mueller.**

La respuesta lineal de un medio a la intensidad de un haz de luz incidente, se representa por un arreglo matricial cuadrado [8]. Está constituido con 16 parámetros y se le denomina Matriz de Mueller [3], (ecuación 2.31). La matriz describe sistemas que pueden afectar a la polarización de un haz incidente, de forma parcial o total.

$$M = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

La respuesta lineal se puede calcular con la ecuación 2.32, pues describe lo que sucede con un haz incidente polarizado cuando interactúa con un medio.

$$\begin{aligned} S^o = MS^i &\Rightarrow \begin{pmatrix} S_0^o \\ S_1^o \\ S_2^o \\ S_3^o \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{pmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} m_{00}S_0^i + m_{01}S_1^i + m_{02}S_2^i + m_{03}S_3^i \\ m_{10}S_0^i + m_{11}S_1^i + m_{12}S_2^i + m_{13}S_3^i \\ m_{20}S_0^i + m_{21}S_1^i + m_{22}S_2^i + m_{23}S_3^i \\ m_{30}S_0^i + m_{31}S_1^i + m_{32}S_2^i + m_{33}S_3^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.32)$$

2.9. Métricas escalares de polarización.

La matriz de Mueller tiene una gran importancia en el análisis de sistemas que tienen la propiedad de modificar la polarización de un haz incidente. Existen métricas escalares que se derivan de los elementos de la matriz de Mueller, las cuales proporcionan información sobre el sistema a analizar y se describen a continuación:

- **Índice de despolarización $DI(M)$.** Es un parámetro que define el porcentaje de despolarización que un sistema puede ocasionar en un haz incidente; en otras palabras, es la pérdida promedio del grado de polarización a un haz de luz que ha interactuado con un medio. Los límites de validez física están dados por $0 \leq DI(M) \leq 1$ y su significado es el siguiente:
 Cuando $DI(M) = 0$, significa que el sistema es totalmente despolarizante ante cualquier haz de luz incidente, sin importar su estado de polarización.
 Cuando $DI(M) = 1$, significa que el sistema es no despolarizante.
 Cuando $0 < DI(M) < 1$, significa que el sistema es parcialmente despolarizante.
 Este parámetro es calculado por medio de los elementos de la matriz de Mueller, con la relación expresada en la siguiente ecuación [9]

$$0 \leq DI(M) = \frac{(\sum_{j,k=0}^3 m_{jk}^2 - m_{00}^2)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3}m_{00}} \leq 1 \quad (2.33)$$

- **Grado de Polarización** $DoP(M, S)$. Este parámetro usualmente se calcula directamente de los vectores de Stokes asociados a la polarización bajo estudio. Sin embargo, brinda mayor información del medio material bajo estudio cuando se relaciona con el haz de luz generado en la interacción del haz incidente con éste. Está relacionado por los elementos de la matriz de Mueller de un medio y el vector de Stokes que describe un haz incidente, de acuerdo a la ecuación 2.34

$$0 \leq DoP(M, S) = \frac{\sqrt{(S_1^o)^2 + (S_2^o)^2 + (S_3^o)^2}}{S_0^o} = \frac{[\sum_{j=1}^3 (m_{j0}S_0^i + m_{j1}S_1^i + m_{j2}S_2^i + m_{j3}S_3^i)^2]^{\frac{1}{2}}}{m_{00}S_0^i + m_{01}S_1^i + m_{02}S_2^i + m_{03}S_3^i} \leq 1 \quad (2.34)$$

La interpretación física es la siguiente. Cuando $DoP = 1$ significa que el haz de luz está completamente polarizado; en el caso opuesto, cuando $DoP = 0$, significa que el haz es no polarizado. En valores intermedios entre 0 y 1, se dice que corresponde a un haz de luz parcialmente polarizado.

- **Diatenuación** $D(M)$. Es la propiedad de un sistema en donde la transmitancia en intensidad depende del estado de polarización incidente. Su valor máximo es 1, que equivale a un polarizador lineal homogéneo, y para su valor mínimo 0 significa que no existe ninguna diatenuación. Para valores intermedios, se interpreta como que el sistema atenúa parcialmente la luz incidente. Se calcula por la siguiente ecuación [8].

$$0 \leq D(M) = \frac{\sqrt{(m_{01})^2 + (m_{02})^2 + (m_{03})^2}}{m_{00}} \leq 1 \quad (2.35)$$

- **Polarizancia** $P(M)$. Describe la capacidad del medio de polarizar un estado de luz no polarizada incidente. Cuando $P(M) = 1$, el significado físico es que el medio polariza totalmente al haz incidente, mientras que para $P(M) = 0$ la interpretación es que el sistema no polariza. Para valores intermedios, el sistema polariza parcialmente [8].

$$0 \leq P(M) = \frac{\sqrt{(m_{10})^2 + (m_{20})^2 + (m_{30})^2}}{m_{00}} \leq 1 \quad (2.36)$$

- **Métrica escalar de despolarización $Q(M)$.** La métrica escalar contiene información muy importante para analizar polariméricamente medios de materiales diversos [10]. El intervalo de valores posibles que puede adquirir es: $0 \leq Q(M) \leq 3$ y su significado es el siguiente [11]
 - $Q(M) = 0$. Sistema óptico totalmente despolarizante.
 - $0 < Q(M) < 1$. Sistema óptico parcialmente despolarizante.
 - $1 \leq Q(M) < 3$. Sistema óptico despolariza la luz parcialmente. Aunque aquí se tienen dos casos en función de $DI(M)$, cuando $0 < DI(M) < 1$ el sistema es parcialmente despolarizante y cuando $DI(M) = 1$, el sistema es no despolarizante y diatenuante.
 - $Q(M) = 3$. Sistema óptico es no despolarizante y no diatenuante; es decir, es un sistema birrefringente puro [12].

$$0 \leq Q(M) = \frac{\sum_{j=1,k=0}^3 m_{jk}^2}{\sum_{k=0}^3 m_{0k}^2} = \frac{3[DI(M)]^2 - [D(M)]^2}{1 + [D(M)]^2} = \frac{\sum_{j,k=0}^3 m_{jk}^2 + [P(M)]^2}{m_{00}^2 + 1 + [D(M)]^2} \leq 1 \quad (2.37)$$

Es necesario mencionar que la matriz de Mueller describe sistemas ópticos pero que debe cumplir con ciertas condiciones para que estos puedan ser físicamente realizables. Existen casos donde los parámetros obtenidos descritos con anterioridad dan información errónea ya que describen sistemas no realizables. En tales circunstancias es donde el análisis se debe realizar para poder descartar posibles causas asociadas a una medición errónea.

Es posible considerar la diatenuación en términos de las polarizaciones lineales “s”, “r” y a $\pm 45^\circ$ como una sola diatenuación lineal (DL) (ecuación 2.38) en función de algunos parámetros de la matriz de Mueller que ofrecen información acerca de estos estados de polarización incidentes, de la misma forma se considera la diatenuación para los estados circularmente polarizados (DC), definidos por la ecuación 2.39 [3]

$$DL = \frac{\sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2}}{m_{00}} \quad (2.38)$$

$$DC = \frac{|m_{03}|}{m_{00}} \quad (2.39)$$

Las métricas con las que es posible obtener información a partir de la matriz de Mueller se generan, desde un punto de vista óptico, de la interacción del sistema bajo estudio con la luz polarizada incidente en la fibra.

Un sistema que no despolariza, puede ser descrito mediante el formulismo matricial de Jones y el formulismo de Mueller es capaz de describir cuando el sistema no despolariza, despolariza parcial y totalmente. La condición necesaria y suficiente para que una matriz de Mueller pueda ser deducida como una matriz de Jones tiene que cumplir con el teorema de Gil-Bernabeu [1], [9]

$$TC = Tr(M^T M) = 4m_{00}^2 \quad (2.40)$$

Donde T indica la operación de transposición.

- **Grado de anisotropía de despolarización (Add).** Esta característica brinda información acerca de si un material despolariza la luz de igual manera para cualquier estado de polarización incidente o si esta despolarización depende del propio estado de polarización incidente. Brinda información sobre la isotropía o anisotropía a la polarización de un haz incidente, se expresa como

$$0 \leq Add = \frac{(DoP)_{max} - (DoP)_{min}}{(DoP)_{max} + (DoP)_{min}} \leq 1 \quad (2.41)$$

Al interpretar los límites, 0 significa que la despolarización es generada por un sistema isotrópico. Para el valor superior de 1, significa que el medio es totalmente anisotrópico, polariméricamente. Los valores intermedios corresponden a medios parcialmente anisotrópicos [13, 14].

- **Pérdidas dependientes de la polarización, (PDL), polarization dependent loss.** Tal como lo dice su nombre, son las pérdidas que tiene el haz incidente al interactuar con el medio y éstas dependen del estado de polarización incidente. La fórmula que lo describe utilizando los parámetros de la matriz de Mueller es [15]:

$$PDL = 10 \log \frac{m_{00} + [(m_{01})^2 + (m_{02})^2 + (m_{03})^2]^{1/2}}{m_{00} - [(m_{01})^2 + (m_{02})^2 + (m_{03})^2]^{1/2}} \quad (2.42)$$

$$PDL = 10 \log(T_{max}/T_{min})$$

2.10. ***Fibras ópticas en Comunicaciones.***

Actualmente, las comunicaciones en el país se realizan de manera segura y eficiente por medio de fibras ópticas. Telmex, es la empresa más importante en México y en América latina en telecomunicaciones, la cual tiene una red muy grande compuesta por fibras ópticas distribuidas sobre toda la extensión territorial, con equipos sofisticados ubicados en ciudades importantes para la transmisión de datos a lo largo de la red. Una fibra óptica, es un conductor óptico filiforme, extremadamente delgado, a través del cual se propaga luz y no señales eléctricas con lo que se elimina la problemática de interferencias.

Esto la hace ideal para entornos en los que haya gran cantidad de interferencias eléctricas. También es inmune a la humedad y a la exposición solar, esto ha hecho que se esté expandiendo la aplicación de redes de comunicación desde grandes distancias para alcanzar grandes velocidades y cantidades de transmisión de datos. Para la radiación electromagnética de muy alta frecuencia en el intervalo de luz visible e infrarroja, se utiliza la fibra de óptica de fibra de vidrio (sílice) que causa muy poca pérdida de energía luminosa a través de largas distancias.

El diámetro de la fibra transmisora debe ser muy pequeño con el fin de minimizar la transmisión reflectora. La fibra transmisora central es de vidrio de baja pérdida y con índice de refracción relativamente alto, este se cubre con un vidrio de mayor pérdida, con menor índice de refracción, para soporte y absorción de rayos que puedan escapar de la fibra central. La fuente de luz en el transmisor puede ser un diodo emisor de luz (LED) o un láser. El detector en el otro extremo puede ser un fotodiodo o un fototransistor.

2.10.1. ***Características.***

- **Estructura.** Contiene una porción central de plástico o de vidrio llamada núcleo, un recubrimiento también de vidrio o plástico llamado revestimiento.

Posteriormente, otra capa cubre a estas como protección llamado encapsulado. En el núcleo es por donde viaja la luz y tiene un índice de refracción mayor que el revestimiento. En la interfaz entre el núcleo y el revestimiento se genera un fenómeno llamado reflexión total interna.

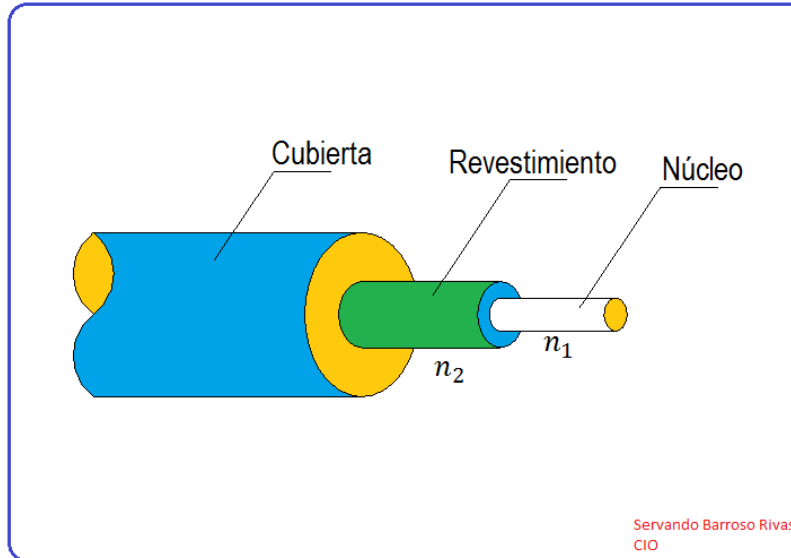


FIG. 2.4 ESTRUCTURA DE UNA FIBRA ÓPTICA

Ancho de banda. Es la cantidad de información o de datos que se puede enviar a través de una conexión de red en un período de tiempo dado. Hoy en día, se tiene un ancho de banda de 50,000 Gbps, pero es limitada por la conversión entre las señales ópticas y eléctricas (1 Gbps). Los pulsos de luz rebotan dentro de la fibra. En una fibra de modo único necesita menor amplificación (por ejemplo, pueden cruzar 30 km a unos cuantos Gbps).

Atenuación y ventajas. La atenuación es la disminución en la cantidad de energía transmitida a medida que la distancia aumenta, ésta se mide en decibeles por kilómetro (dB/Km) y se ha determinado que, en longitudes de onda concretas, puede considerarse como extremadamente reducida la atenuación de una fibra. La atenuación en una fibra es medida al comparar la potencia de salida con la potencia de entrada. Hay diversos factores que hacen variar la atenuación como lo son la dispersión de la luz y la absorción por impurezas del material, además de estos, se tiene el ancho de banda de la fibra; es decir, el diámetro y pérdidas de luz fuera del núcleo causado por factores ambientales [16].

Las pérdidas pueden ser intrínsecas o extrínsecas. Las primeras dependen de la composición del vidrio, impurezas, etc. y se pueden evitar. Las ondas de luz en el vacío no sufren ninguna perturbación, pero si se propagan por un medio material, interactúan con ésta produciéndose un fenómeno que origina pérdidas debidas a dos factores, absorción y dispersión. Las pérdidas extrínsecas son debidas al mal cableado o empalmes realizados a lo largo del trayecto de comunicación. Los radios de curvatura excesivamente pequeños (menor a 4 o 5 cm), provocan que la luz escape del núcleo hacia el recubrimiento, ocasionando

pérdidas en la señal transmitida. Esto ocurre porque la luz supera el ángulo máximo de la reflexión total interna.

- Tipos de fibras. Los dos tipos de fibras más usuales en la industria (TELMEX), son llamados monomodo y multimodo. A continuación se describen las características asociadas a cada uno de ellos [16]:
 - Fibra monomodo: la relación entre el núcleo y el recubrimiento es de $8 - 9/125\mu m$, posee un único trayecto de luz, es relativamente más costosa, usada principalmente en WAN (Wide Area Network, red de área amplia) y típicamente se fabrica en un encapsulado color amarillo y gris para facilitar su identificación por parte del personal técnico.
 - Fibra multimodo: la relación entre el núcleo y el recubrimiento es de $62.5 - 50/125\mu m$, posee múltiples trayectos de luz, es relativamente económica, usada principalmente en LAN (Local Area Network, red de área local) y típicamente se encapsula en color naranja. En la figura 2.5 se presenta en color azul.

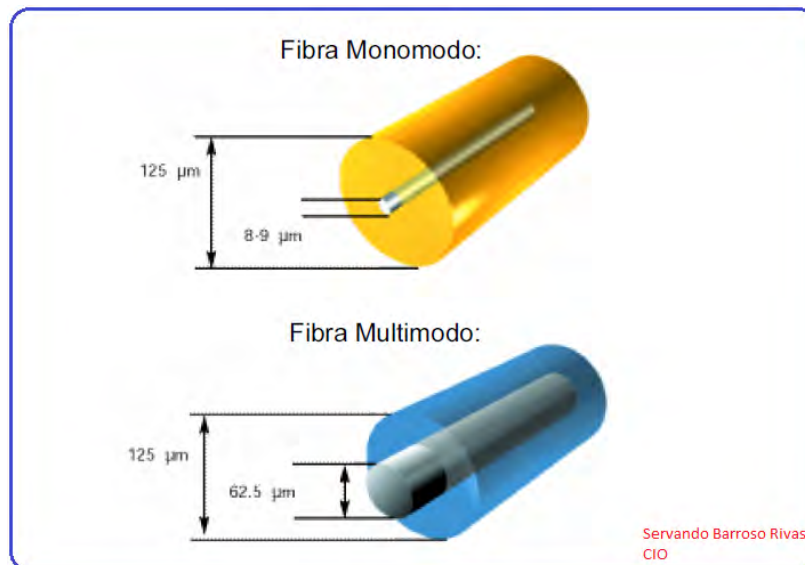


FIG. 2.5 TIPOS DE FIBRAS USADAS POR TELMEX.

2.10.2. Elementos de enlace de comunicación con fibra óptica.

Un enlace básico de comunicaciones ópticas consta de tres elementos fundamentales:

- Emisor: La fuente productora de luz, generalmente un diodo láser (LD) o diodo emisor de luz (LED). El emisor contiene una serie de circuitos

electrónicos destinados para generar las señales a transmitir y enviarlas al dispositivo optoelectrónico.

- Medio: El medio de transmisión por excelencia es la fibra óptica. El material más empleado en fibras ópticas es el sílice (SiO_3), por su extraordinaria transparencia dentro de un amplio intervalo de longitudes de onda. Además, puede ser dopado por otros componentes para modificar su índice de refracción. Para distancias cortas se usan fibras de plástico POF (Polymer Optical Fiber).
- Receptor: Este elemento es el más complejo del sistema de comunicaciones ópticas. Consta de un detector optoelectrónico, como puede ser un fotodiodo (PIN) o un diodo de avalancha (APD) y una serie de circuitos recuperadores de señales, como amplificadores, filtros, comparadores, etc.

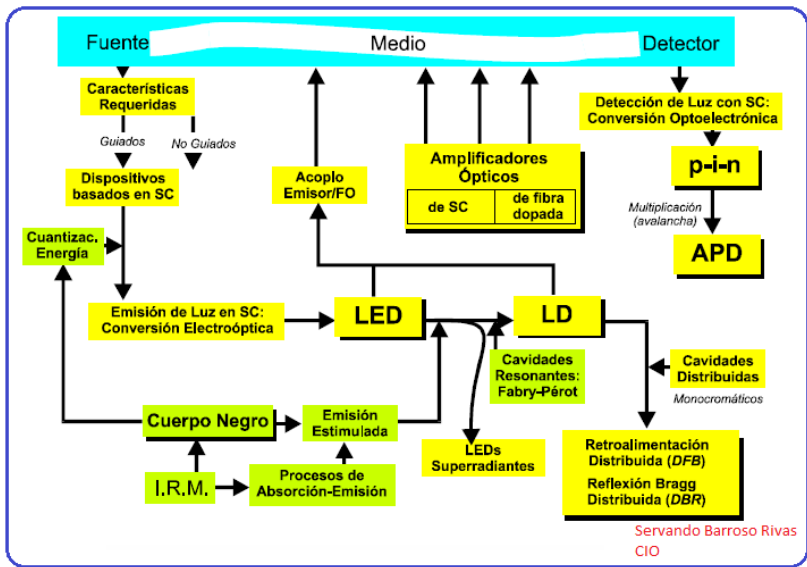


FIG. 2.6 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA.

Los tres elementos que se describen con anterioridad tienen mucha importancia para que la comunicación se lleve a cabo. En la figura 2.6 se muestra una descripción gráfica de un enlace óptico típico. Para este caso, el medio (fibra óptica) presenta las opciones para que la señal pueda ser enviada y recibida con la misma o con la mayor calidad posible, sin distorsionar la información. Notación:

LED: Diodo emisor de luz (Light Emitting Diode).

LD: Diodo láser (Laser Diode).

APD: Diodo de Avalancha (Avalanche Photo Diode).

Pin: Fotodiodo p-i-n.

DFB: Láser de realimentación distribuida.

DBR: Láser de reflexión de Bragg.

IRM: Imagen por resonancia magnética.

FO: Fibra óptica (Fiber optic).

La figura 2.7 muestra los diferentes parámetros y elementos que se deben considerar para que la información o señal enviada sea de la mayor calidad posible.

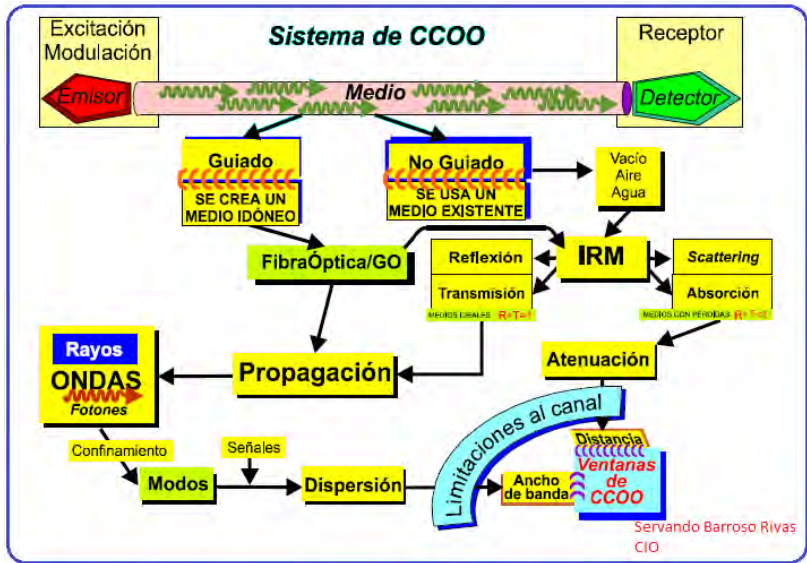


FIG. 2.7 ESQUEMA DE LOS ELEMENTOS AUXILIARES DE LA FIBRA.

Para poder entender el comportamiento de la luz en una fibra óptica, se describen los siguientes conceptos básicos de óptica.

2.10.3. **Reflexión y refracción.**

Cuando un haz de luz encuentra en su camino una superficie dieléctrica, se desdobra en dos haces, uno reflejado y otro refractado o transmitido, cuyos ángulos están relacionados con el ángulo de incidencia a través de la Ley de Snell [2], según se aprecia en la figura 2.8

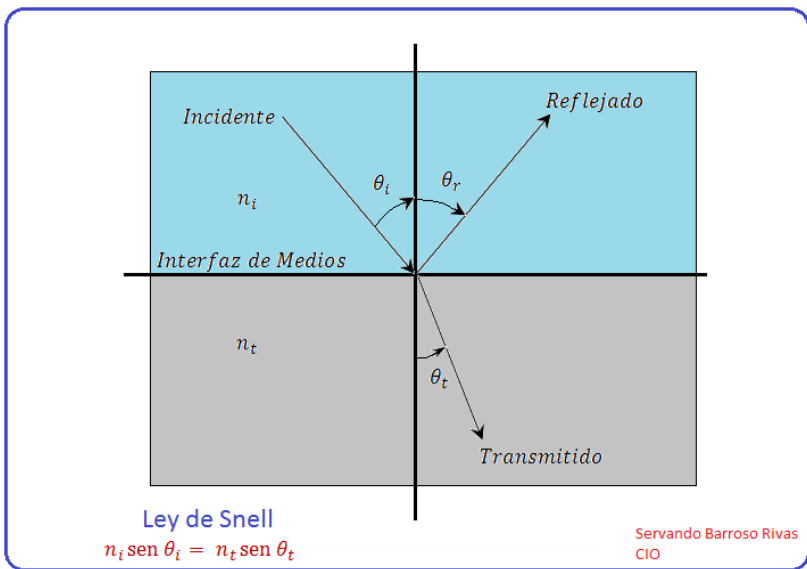


FIG. 2.8 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN, LEY DE SNELL.

La ley de Snell, es expresada por la ecuación 2.43

$$n_i \text{ sen } \theta_i = n_t \text{ sen } \theta_t \quad (2.43)$$

2.10.4 **Ángulo crítico y reflexión total.**

Usando la ley de Snell, se comprueba fácilmente que un haz luminoso con cualquier ángulo de incidencia puede separarse en una parte reflejada y otra transmitida [2]. Esto porque también se genera un haz reflejado y otro transmitido, aún cuando el índice de refracción del medio incidente sea mayor al del transmitido (si el ángulo de incidencia es menor al ángulo crítico)

Si se aumenta paulatinamente el ángulo de incidencia en un medio incidente con mayor índice de refracción que el asociado al transmitido, se alcanza un valor, llamado **ángulo crítico**, para el cual el haz de salida es rasante con la interfaz de los medios, esto sucede cuando ($\text{sen } \theta_t = 1$). Para ángulos superiores al ángulo crítico se produce un fenómeno denominado **reflexión total interna**; es decir, no existe componente transmitida y no se producen pérdidas en la reflexión. Este fenómeno resulta fundamental para las Comunicaciones Ópticas.

2.10.5. **Guiado de luz.**

Como se explicó en la sección 2.10.1, se requiere guiar la luz por el interior de un dieléctrico sin pérdidas por reflexiones, o bien que estas sean mínimas. Las fibras ópticas tienen pérdidas por reflexión difusa y absorción. El conjunto de pérdidas se denomina atenuación. A lo que se refiere aquí es a la ausencia de pérdidas de la propia reflexión total interna. Por consiguiente, se necesita disponer de una lámina de cilindro de material dieléctrico rodeado de otro dieléctrico de menor índice de refracción. Cuando la estructura es plana (como sándwich), se dice que se tiene una **guía de onda plana**.

Las guías de onda se emplean preferentemente en Óptica Integrada y también conforman la estructura de los diodos láser y los LEDs. Lo más normal, sin embargo, es que la guía de onda tenga forma de un hilo, con el dieléctrico de bajo índice rodeando al de alto índice. Esto se trata de una fibra óptica y los dos dieléctricos reciben el nombre de cubierta (cladding) y núcleo (core), respectivamente. La diferencia de índices entre el núcleo y la cubierta suele ser muy pequeña, alrededor del 1%.

2.10.6. *Apertura numérica.*

En óptica, la apertura numérica de un sistema óptico es un número adimensional que caracteriza el rango de ángulos para los cuales el sistema acepta luz. Recíprocamente, también está relacionado con el ángulo de salida del sistema. La definición exacta del término varía según diferentes áreas de la óptica. La luz se guía sin pérdidas únicamente cuando incide en la unión medios con un ángulo mayor que el ángulo crítico. Esta es una limitación al ángulo de entrada (llamado aceptación) de la radiación por el extremo de la guía; es decir, que el ángulo crítico determina un ángulo máximo de aceptación α_m (figura 2.9), por encima del cual la luz introducida a la guía de onda no se guía.

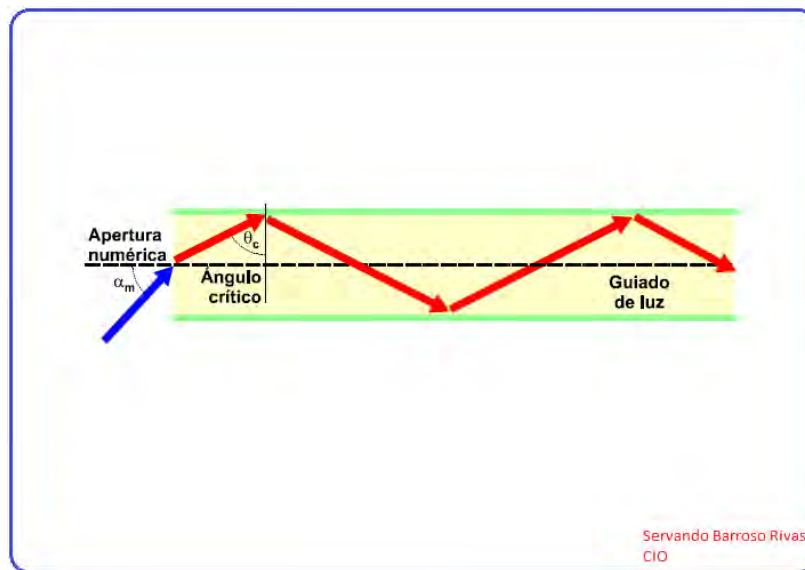


FIG. 2.9 APERTURA NUMÉRICA.

El seno de éste ángulo recibe el nombre de apertura numérica (AN) y es un parámetro fundamental que caracteriza a una fibra óptica o guía de onda plana. La apertura numérica puede ser calculada con la ecuación 2.44

$$AN = \text{sen } \alpha_m = \sqrt{n_n^2 - n_c^2} \quad (2.44)$$

n_n : núcleo n_c : revestimiento

2.10.7. *Modos de propagación.*

Cuando se pretende aplicar una teoría electromagnética rigurosa al fenómeno del guiado de la luz, los planteamientos no son tan simples. Lo que sucede es que se sigue cumpliendo que existe un ángulo de aceptación máximo, pero el hecho de introducir la radiación luminosa con un ángulo menor al

correspondiente valor AN no garantiza que la luz se guíe correctamente. Para que la luz se guíe se requiere, además, que forme en el interior de la guía de onda una distribución de campo cuya componente transversal sea estacionaria. Las distintas “maneras” o “formas” en que puede conseguirse tal condición (en último término, una serie de soluciones matemáticas de la ecuación de onda) se denominan modos [16].

Cada modo lleva asociada una constante de propagación, que de cierta forma mide la velocidad con que se propaga cada modo en la fibra, que se calcula por medio de:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_n \text{ sen } \theta \quad (2.45)$$

Si la radiación fuese no guiada, se propaga en el medio como Kn_n . Al ser guiada se propaga según β . Comparando ambos casos surge el concepto de índice efectivo N , la radiación acoplada en cada modo se propaga con un índice en el núcleo de:

$$N = \frac{\beta}{K} = n_n \text{ sen } \theta \quad (2.46)$$

En la figura 2.10 se muestran los modos principales de una fibra óptica multimodo. Los cuales se obtienen con la expresión siguiente, la distribución de intensidad de los modos LP en el núcleo de la fibra óptica, ecuación 2.47 [17].

$$I_{nm} = I_0 J_n^2\left(\frac{ur}{a}\right) \text{ sen}^2(n\varphi), \text{ para } r \leq a \quad (2.47)$$

Donde $u^2 = k_1^2 - \beta^2$ y $k_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda}$, a es el radio de núcleo de la fibra, I_0 es el pico de intensidad máxima, r y φ son variables radiales y angulares transversales al núcleo de la fibra. J_n es la función Bessel de orden n . Además, n representa la mitad del número de mínimos (o máximos) que ocurren en el patrón de intensidad, y m indica el número de máximos en el patrón de intensidad que ocurren en una línea radial entre cero e infinito.

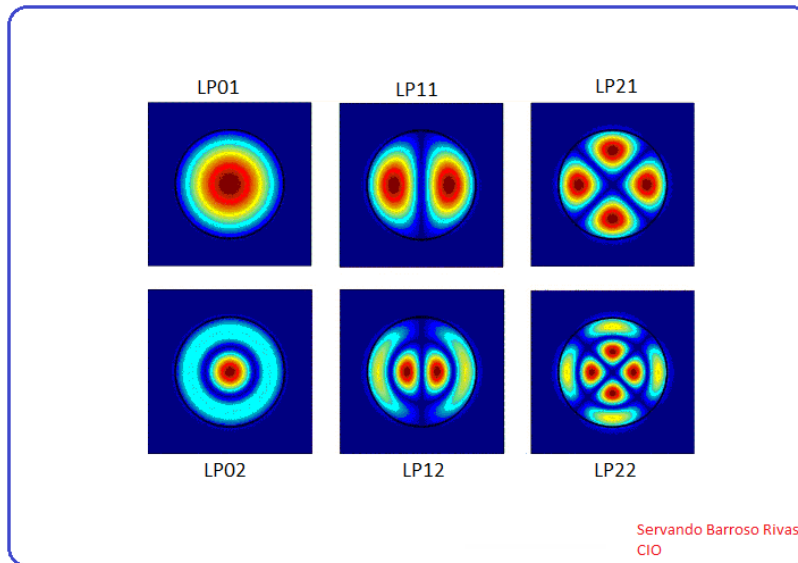


FIG. 2.10 MODOS DE PROPAGACIÓN.

El número de modos son calculados por la ecuación 2.48, donde se obtiene la frecuencia normalizada.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(AN) \quad (2.48)$$

Donde a , es el radio del núcleo de la fibra.

La fibra monomodo se diseña para que se propague un solo modo. En una fibra multimodo se propagan varios modos. Sin embargo, una fibra monomodo diseñada para operar a 1550 nm puede comportarse como una fibra multimodo si en ella se propaga radiación a una longitud de onda por debajo de la que fue diseñada [17].

2.10.8. **Degradación de la señal.**

Si en una fibra óptica existen varios modos capaces de transportar luz guiada, se producen retrasos de la potencia transportada por unos modos respecto a otros. La idea fundamental en el área de las comunicaciones ópticas es que si la energía de un pulso luminoso se distribuye en la entrada de varios modos, llegará al otro extremo en forma de pulso ensanchado. Este fenómeno se conoce como dispersión intermodal.

Si la fuente que se emplea como emisor de luz no es completamente monocromática, también se ensanchan individualmente los pulsos guiados por cada uno de los modos. Este fenómeno se le llama dispersión intramodal.

Con cada uno de los tipos de fibras, estos fenómenos pueden reducirse o eliminarse, por ejemplo para las fibras monomodo, permiten eliminar la dispersión intermodal mejorando considerablemente el ancho de banda. Para este tipo de fibras es necesario que el núcleo sea más pequeño, complicando el acoplo con el emisor, además de un haz de luz bien colimado. Estas características las ofrecen los diodos láser y algunos LEDs especiales.

Usualmente las fibras monomodo se utilizan en conjunto con diodos láser. Para el tipo de fibra multimodo, el núcleo es mucho mayor que las tipo monomodo, por lo que se facilita el acoplo con el emisor; pero su contraparte, es que se presenta dispersión intermodal, que puede ser catastrófica en distancias muy largas, pues reduce drásticamente el ancho de banda. Mientras que el candidato ideal para servir de fuente a este tipo de fibra es el LED.

2.10.9. **Factores que limitan la transmisión.**

Existen factores muy importantes que deben tomarse en cuenta al diseñar un enlace óptico de transmisión. Entre ellos están la dispersión y la atenuación, que enseguida se describen.

Dispersión: La dispersión temporal de los pulsos tiene dos orígenes fundamentales: intermodal e intramodal. La primera, la más grave, puede reducirse e incluso eliminarse usando fibras monomodo. Pero estas fibras, presentan una dispersión intramodal y tiene dos causas diferentes, asociados con los nombres de dispersión de guía de onda y dispersión del material. Con la fortuna de que, en el rango de longitudes de onda de interés, los efectos de estas dos dispersiones son contrapuestos, pudiendo existir una λ con dispersión nula. Para una fibra de sílice sin modificar, este punto se da alrededor de los 1310 nm.

Atenuación: Como su nombre lo indica, este fenómeno atenúa la señal de entrada o coloquialmente la debilita. Los dos fenómenos que generan la atenuación son: reflexión difusa o scattering y la absorción. La primera tiene una dependencia exponencial inversa con la longitud de onda; mientras que la segunda, presenta máximos en la zona ultravioleta e infrarroja. En combinación, configuran zonas donde se dan las mejores condiciones para la transmisión por fibra óptica. Para la fibra de sílice, mayormente utilizada, se tienen tres regiones importantes en λ . Actualmente las zonas más usadas, se ubican en 1310 nm y 1550 nm y la que menos se utiliza está en los 820 nm.

Para la primer zona (1310 nm), se presenta una mínima dispersión y la segunda (1550 nm) produce una mínima atenuación.

Para este trabajo se utiliza la segunda región, ya que debido a su mínima atenuación, es la región espectral donde pueden emplearse los amplificadores de fibra dopada. Para mejorar las características de dispersión, se han diseñado fibras ópticas, de dispersión desplazada y de dispersión aplanada que presentan mínimos de dispersión en la zona de 1550 nm.

2.11. ***Tecnología en TELMEX en comunicación con fibras ópticas.***

Dentro de las tecnologías que se utilizan en los equipos en TELMEX están las siguientes:

Multiplexación, es una técnica que permite transmitir simultáneamente varias señales, sin que éstas se interfieran entre sí, por un único canal físico de comunicaciones. Se tiene tres tipos de multiplexación FDM, TDM y WDM. La primera FDM, (Frequency Division Multiplexing), Multiplexación por División de Frecuencia, es una técnica que consiste en dividir el ancho de banda de un canal de comunicaciones en subcanales de comunicaciones independientes entre sí. A cada subcanal se le asigna un intervalo de frecuencia diferente, pero comprendido en el ancho de banda total disponible en el canal [18].

TDM, Time Division Multiplexing, Multiplexación por División de Tiempo, técnica que consiste en dividir el ancho de banda de un canal de comunicaciones en subcanales independientes entre sí, donde a cada uno se le asigna un intervalo de tiempo diferente, pero comprendido en el ancho de banda total disponible en el canal [19].

WDM, Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de Longitud de Onda, consiste en la transmisión de dos o más flujos de información simultáneos sobre una misma fibra óptica, en el mismo sentido u opuesto y utilizando distinta longitud de onda en cada caso [20].

Para cada tipo de multiplexación, unión de dos o más señales, al final del enlace de comunicación es necesario separar las señales, lo más idénticas a como fueron enviadas, para esto es necesario el proceso de demultiplexación, que es la técnica que consiste en separarlas.

¿Porque utilizar WDM? es debido a la necesidad de utilizar más el ancho de banda de la fibra óptica con los nuevos servicios que los clientes ocupan en sus sistemas, tales como PDH, FDDI, GigabitEthernet, ESCON, IP, ATM/DTM, entre otros. Las ventajas que se tienen sobre las demás multiplexaciones, son:

- Optimizan el rendimiento de la redes de fibra óptica.
- Solucionan cuellos de botella.
- Reducen los costos de inversión, instalación y mantenimiento.
- Permiten incrementar la capacidad de una fibra óptica.
- Sistemas de muy bajo consumo energético.
- Sistemas modulares, escalables y multiformato de datos.
- Facilitan el mantenimiento preventivo.
- Permiten una sencilla instalación y configuración.

Para poder utilizar la técnica DWDM, existen 3 tipos de equipos que son; WDM (Wavelength Division Multiplexer), CWDM, (Coarse Wavelength Division Multiplexer) y DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexer)

DWDM es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1550 nm). Es un método de multiplexación muy similar a la multiplexación por división de frecuencia que se utiliza en medios de transmisión electromagnéticos. Varias señales portadoras (ópticas) se transmiten por una única fibra óptica utilizando distintas longitudes de onda de un haz láser en cada una de ellas. Cada portadora óptica forma un canal óptico que podrá ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio (fibra óptica) y contener diferente tipo de tráfico. De esta manera se puede multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica, así como facilitar comunicaciones bidireccionales. Se trata de una técnica de transmisión muy atractiva para las operadoras de telecomunicaciones ya que les permite aumentar su capacidad sin tender más cables ni abrir zanjas.

Para transmitir mediante DWDM son necesarios dos dispositivos complementarios: un multiplexor en lado transmisor y un demultiplexor en el lado receptor. A diferencia del CWDM, en DWDM se consigue un mayor número de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos DCM "Dispersion Compensation Modules". De esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Actualmente se pueden conseguir 40, 80 o 160 canales ópticos separados entre sí, 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz respectivamente.

Capítulo III: Pruebas y experimentos

En este capítulo se describe la metodología utilizada para la determinación experimental de la matriz de Mueller, mediante la caracterización polarimétrica de fibras ópticas.

Para la caracterización polarimétrica en fibras ópticas tipo monomodo, se utilizaron varios dispositivos conectados entre sí. El arreglo experimental tiene tres partes principales, el generador de estados de polarización (PSG), el medio a analizar (Fibra Óptica) y el analizador de estados de polarización (PSA).

La luz polarizada es usada para caracterizar la respuesta lineal de medios, en este trabajo el medio es una fibra óptica monomodo. En el análisis existen métricas, explicadas en el capítulo anterior, que describen totalmente la respuesta de los medios a su interacción con la luz polarizada. Esta información esta condensada en una matriz cuadrada con 16 elementos reales (4x4) llamada matriz de Mueller.

Para este proyecto, se analiza la fibra óptica para proporcionar información al diseñador de enlaces, considerando las ventajas de un haz polarizado, con el fin de que la transmisión sea de calidad y de forma segura. E inclusive, poder enviar información codificada con polarización, si así se requiere.

3.1. **Arreglo experimental.**

El sistema óptico para realizar la caracterización de fibras monomodo de TELMEX, es constituido por equipos sofisticados y relativamente costosos. Su principal objetivo es determinar la matriz de Mueller y la aplicación de las diferentes métricas de polarización, las cuales aportan información importante para conocer el comportamiento de luz polarizada, al interaccionar con un medio.

La caracterización de sistemas ópticos o materiales por medio de la luz polarizada se presenta como una herramienta en el estudio de propiedades ópticas de los materiales [21], [22].

En la figura 3.1 se muestra un esquema general del arreglo óptico para la caracterización de una fibra óptica. El sistema cuenta con una fuente de luz láser de longitud de onda de 1550 nm, un generador de estados de polarización (PSG), la fibra óptica a estudiar y el analizador de estados de polarización (PSA). Para el manejo y control del generador y analizador de estados de polarización se usa una computadora con puertos USB.

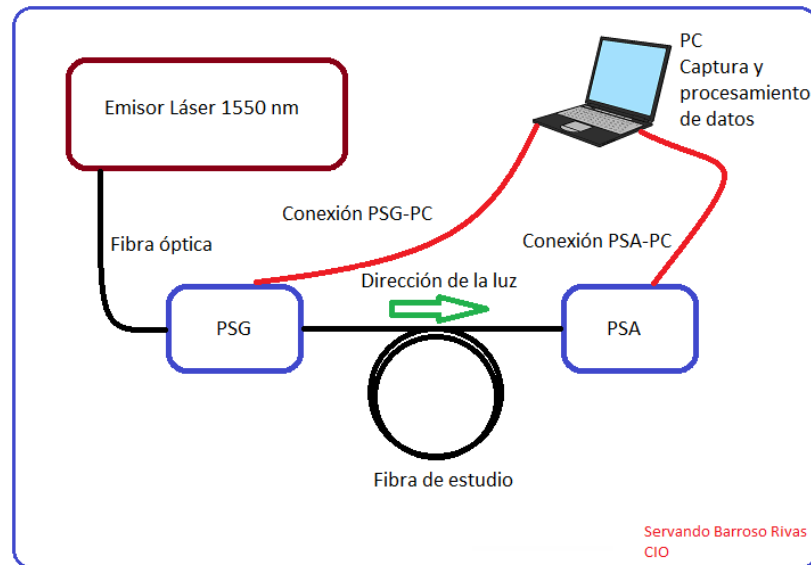


FIG. 3.1 SISTEMA GENERAL DE PRUEBA

3.1.1. *Emisor de luz láser sintonizable.*

El sistema cuenta con una fuente de luz láser sintonizable entre el rango de 1490 nm a 1580 nm (usado en 1550nm) (Tunics Plus 10, Aritsu) [22]. Tiene una amplia cobertura espectral, con un máximo de 90 nm de rango de ajuste. Se puede ajustar a una potencia máxima de +12 dB, facilitando la provisión de energía y proporcionando mediciones de alto rango dinámico. Para un máximo rendimiento, ofrece una propiedad de control activo patentado que asegura una operación perfecta de modo de salto libre (mode-hop-free) y una exactitud en la longitud de onda a lo largo de todo su rango de barrido. Amplia capacidad de ajuste, rápida y continua, con una resolución suave hasta de 1 pm, permitiendo un fino análisis a lo largo del rango espectral. Contiene interfaces RS232 para su monitoreo desde una PC convencional. El láser sintonizable tiene botoneras para configurar la longitud de onda de la luz que se emitirá, para este propósito, se configura para una longitud de onda de 1550 nm y una potencia de +4 dBm. Para conectarlo y propagar el haz incidente se utiliza un conector para fibra óptica tipo FC.

La fibra que conduce la luz de la fuente y alimenta el generador de estados de polarización, PSG es de tipo monomodo con un bajo índice de atenuación, que contiene un acoplamiento (empalme) con cortes a un cierto ángulo, para evitar que la luz láser rebote hacia el emisor de luz, evitando así un daño irreversible en los equipos.

Durante la calibración del PSG (Thorlabs, DPC5500), se debe habilitar y deshabilitar la emisión láser de la fuente. Para ello, es necesario utilizar el botón

“ENABLE” y cumplir con dicho procedimiento de calibración acorde a lo señalado en el manual de operación.

Para una mejor medición, se debe dejar emitiendo el láser, con su respectivo valor de longitud de onda y potencia, durante 15 o 20 minutos, para que la emisión sea más estable, sin perturbaciones. Aunque el PSG tiene la característica de no variar la salida de luz polarizada sin importar qué variaciones sucedan a la entrada del mismo.

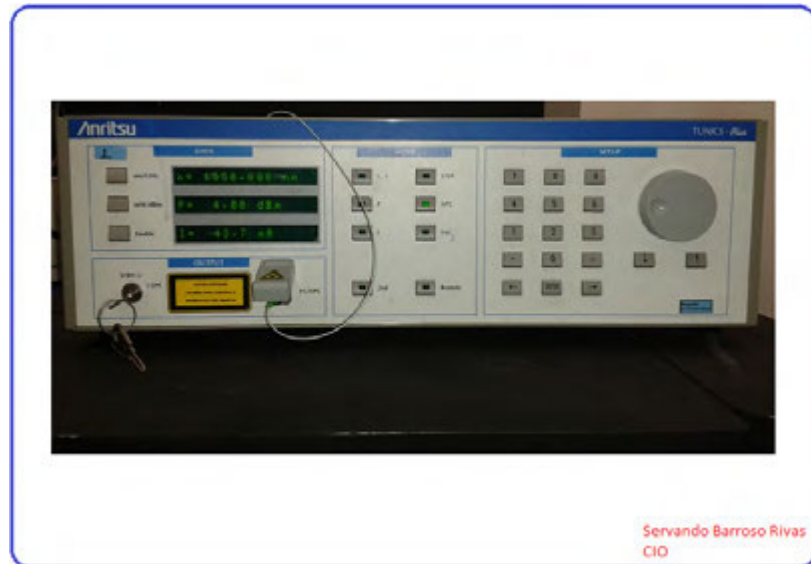


FIG. 3.2 LÁSER SINTONIZABLE (1550 NM)

3.1.2. *PSG Generador de estados de polarización.*

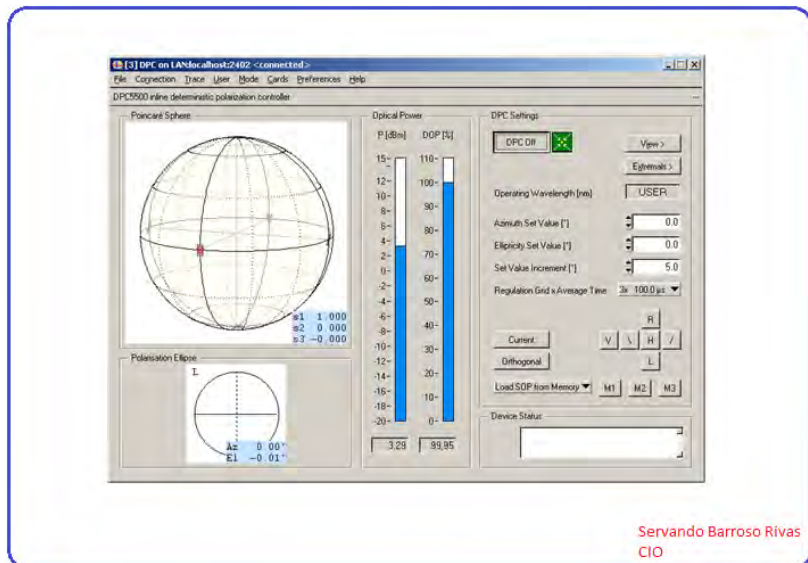
El generador de estados de polarización (PSG) (Thorlabs, DPC5500) figura 3.3 [23], es un controlador de polarización activa que permite el ajuste determinista de una polarización de salida, independientemente de la polarización de entrada. Su rango de trabajo es de 1510 a 1640 nm y usando una calibración puede cubrir el rango de 1200 a 1700 nm, con una potencia máxima de entrada de +15dBm. Contiene una interfaz gráfica exhibida en una PC convencional, donde se muestra la esfera de Poincaré, indicando los estados de polarización que se generan a la salida del controlador. La entrada y la salida de la luz se hace a través de conexiones tipo FC. El módulo TXP, que contiene tanto el módulo del PSG, como el módulo asociado al analizador de estados de polarización, PSA, según se aprecia en la figura 3.3. También se hace la instalación del controlador para liberar los puertos de comunicación de la PC, así como también el programa de la interfaz gráfica.



Servando Barroso Rivas
CIO

FIG. 3.3 CONTROLADOR GENERADOR DE ESTADOS DE POLARIZACIÓN DPC5500

Para realizar las pruebas con mayor precisión, es necesario calibrar el controlador generador de estados de polarización. Para esto, se lleva a cabo un proceso que se indica paso a paso por el programa del controlador instalado en la PC. Es recomendado por el fabricante, usar una potencia de +4dB para su calibración.



Servando Barroso Rivas
CIO

FIG. 3.4 INTERFAZ GRÁFICA DEL CONTROLADOR GENERADOR DE ESTADOS DE POLARIZACIÓN DPC5500

En la figura 3.4 se muestra la interfaz gráfica del generador de estados de polarización. Se aprecia en la parte superior la barra de menús, donde se controla la conexión, la calibración del sistema, la cantidad de muestreo por segundo y

algunas opciones más avanzadas que no fueron utilizadas en este trabajo. También se muestra la esfera de Poincaré, que indica el estado de polarización que se genera y se emite por la salida del controlador, con sus respectivos valores de los vectores de Stokes, la elipse de polarización con sus parámetros de acimut y elipticidad.

En la parte central de la interfaz, se muestran dos barras de color azul, donde se monitorea el grado de polarización de la luz láser y su potencia incidente en la fibra óptica bajo estudio, respectivamente. Para el control de la generación de los estados de polarización, se tienen dos formas de construirlos, ya sea con los botones que generan los 6 estados (paralelo p , perpendicular s , a $+45^\circ$ $+$, a -45° $-$, polarización circular derecha r y polarización circular izquierda l) o ingresando en los cuadros de diálogo correspondientes los valores del acimut y elipticidad para cada estado deseado.

3.1.3. **PSA, Sistema de Análisis de estados de Polarización.**

Para realizar las mediciones de la respuesta del sistema (fibra óptica) a los diferentes estados de polarización, se utiliza un PSA (Analizador de estados de polarización) de la marca ThorLabs, modelo PAX5710 IR3 [24]. El sistema analizador de polarización consiste en un ordenador central TXP, una tarjeta PAX5710 y una cabeza de medición PAN5710, figura 3.5. El polarímetro tiene diferentes tipos de configuraciones dependiendo el código de pedido.



FIG. 3.5 CABEZA PAN7510 IR3 CON SENSOR EN EL RANGO IR3 (1300 NM A 1700NM)

Para nuestro caso el modelo es PAN5710 IR3, que cuenta con:

- Sensor de medición de polarización para un rango de longitud de onda específico.
- Cable de interfaz de encendido y apagado.
- Sistema para colimar, apropiado al rango de la longitud de onda.
- IR3: rango de 1300nm a 1700nm.



FIG. 3.6 PARTE IZQUIERDA: PAX5710 CONECTADO AL PAN5710 IR3, PARTE DERECHA: TXP5004 INTERFAZ A PC.

Para el manejo y adquisición de los datos medidos, la tarjeta TXP5004, figura 3.6, cuenta con una interfaz tipo USB, la cual es conectada y manipulada por una PC convencional. Al igual que el controlador de polarización DPC5500, el analizador cuenta con un software para capturar los datos, para posteriormente procesarlos y obtener las métricas de interés. Para un mejor manejo, el software cuenta con una interfaz gráfica, donde puede visualizarse los valores de la respuesta polarimétrica de la fibra óptica estudiada.

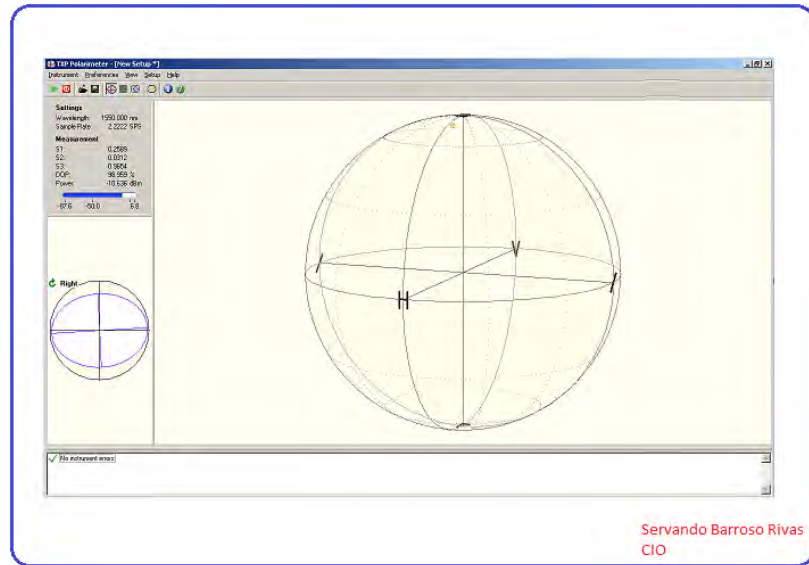


FIG. 3.7 INTERFAZ GRÁFICA DEL ANALIZADOR

La interfaz se muestra en la figura 3.7, donde se muestra una serie de parámetros medidos por el sensor, longitud de onda, muestras por segundo, vectores de Stokes, grado de polarización DOP, potencia de la luz captada y una de las partes más importantes, junto con los vectores de Stokes, es la esfera de Poincaré, que ubica la posición relativa de polarización sensada. El estado de polarización resultante se describe de tres maneras: mediante la esfera de Poincaré, los parámetros de Stokes y las variables polarimétricas acimut y elipticidad [13]. El dispositivo utiliza un software que analiza el estado del haz saliente de la fibra óptica, este es tratado por una descomposición de Fourier para poder ser representado como un vector de Stokes resultante.

La interfaz tiene la opción de capturar una serie de datos, para promediar los valores y generar un archivo con extensión *.csv, el cual puede ser leído desde Excel y MatLab.

Los datos son procesados con el software MatLab, con un programa realizado por el asesor de este trabajo (Dr. Rafael Espinosa Luna), que permite el cálculo de la matriz de Mueller y con ella se obtienen las métricas que caracterizan un medio, en este caso, la fibra óptica monomodo de TELMEX.

Las métricas de polarización son descritas en función de los 16 elementos de la matriz de Mueller, con ellas es posible describir y caracterizar el comportamiento de la fibra a cada estado de polarización incidente.

3.1.4. **Cortadora de fibra óptica y conectores FC.**

Durante el proceso de preparación de las fibras ópticas, es necesario preparar las puntas de las fibras ópticas para su estudio. Para dicha preparación se utilizan unas tijeras peladoras para cubiertas ajustables especiales, figura 3.8, que tienen la función de retirar la cubierta plástica de protección de las fibras.

Estas tijeras peladoras tienen una abertura de 125 μm , el cual corresponde al diámetro del revestimiento de la fibra, con la que puede retirarse la mayor cantidad posible de plástico sin rasgar la superficie exterior del revestimiento.

Después de retirar la cubierta plástica, la fibra se limpia con alcohol etílico o etanol $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, para quitar cualquier impureza o suciedad que hubiese quedado en el corte y en la superficie exterior.



FIG. 3.8 PELADORA AJUSTABLE PARA CUBIERTAS DE FIBRAS.

Para realizar los cortes de fibra óptica y adaptar los conectores tipo FC, es necesario utilizar una cortadora de fibra. En este caso se utilizó una cortadora marca Fitel/Furukawa, parte del kit de una empalmadora de fibra óptica, proporcionado por el laboratorio de fibras a cargo del Dr. Ismael Torres del CIO. La figura 3.9 muestra la cortadora utilizada.



FIG. 3.9 CORTADORA DE FIBRA MARCA FITEL/FURUKAWA.

El procedimiento para realizar el corte, es muy sencillo ya que la cortadora cuenta con una serie de números pegados en diferentes elementos móviles. Solo es necesario dejar la fibra óptica sin cubierta una longitud alrededor de 1.5cm., y posteriormente seguir la secuencia de la cortadora.

Los conectores para acoplar la fibra óptica son del tipo FC marca Bullet, mostrados en la figura 3.10. La preparación anterior de la cortadora, es con el fin de colocar de forma adecuada la fibra a través de los conectores.



FIG. 3.10 CONECTORES FC CON ACOPLADORES MARCA BULLET

Al realizar el ensamblaje de los conectores con la fibra, se debe tener mucho cuidado para su colocación, pues la fibra es muy fácil de quebrarse y con

ello se puede obstruir el orificio del conector. La fibra debe salir 1 mm como máximo del orificio para generar un mejor acoplamiento a los equipos de medición y prueba. Después de realizar los cortes de la fibra, se debe tener cuidado con que la fibra no entre en contacto con otra superficie, esto para evitar que el corte se dañe, ocasionando mediciones erróneas.

3.1.5 **Fibra Óptica NZ-DSF G.655 (TELMEX).**

La fibra óptica estudiada en este trabajo es del tipo G.655 (ITU-T¹) fabricada por Corning® y es utilizada en las redes de larga distancia de TELMEX. Las características de este tipo de fibra son muy óptimas para las conexiones de banda ancha.

La fibra óptica NZ-DSF² G.655 LEAF de Corning es la ganadora indiscutible [25] al ser la fibra de dispersión desplazada diferente de cero es utilizada estandarizada en comunicaciones comerciales. La fibra LEAF es un producto técnicamente avanzado que provee mayor capacidad, amplia flexibilidad a los sistemas y un desempeño superior. Adicionalmente, la fibra LEAF es líder en la industria en especificaciones de dispersión de modo de polarización (PMD) y presenta las menores pérdidas de atenuación que cualquier otra fibra NZ-DSF en el mercado, permitiendo a las redes evolucionar de los sistemas actuales de 10G a los sistemas de 40G y 100G del futuro.

La propiedad fundamental de estas fibras es que su coeficiente de dispersión cromática es, en valor absoluto, mayor que cero en la gama de longitudes de onda 1530 a 1565 nm. Esta dispersión reduce la aparición de fenómenos no lineales, que pueden ser particularmente perjudiciales en sistemas DWDM [usando la banda C (1550 nm)]

Las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, muestran las características ópticas, geométricas y mecánicas y ambientales respectivamente.

Parámetros ópticos	Fibra NO Cableada	Fibra Cableada
Atenuación a 1550 nm	≤0.22 dB/Km	≤0.24 dB/Km
Punto de discontinuidad max a 1550 nm	≤0.05 dB	
Punto de dispersión cero	1500 nm	
Pendiente de dispersión cero	≤0.092 ps/nm ² .Km	
Coficiente de dispersión cromática (1530 -1565 nm)	≤2.0-6.0 ps/nm.Km	
Dispersión en 1550 nm	4 ps/nm.Km	
PMD fibra individual	≤0.10 ps/√Km	

¹ ITU: International Telecommunication Union, ITU-T : ITU Telecommunication Standarization Sector

² NZ-DSF: Non Zero Dispersion-Shifted Fibers

PMDq (Q=0.01%, N= 20)	≤ 0.08 ps/vKm	
Índice de refracción de grupo efectivo	1.4691	

TABLA. 3.1 PARÁMETROS ÓPTICOS

Parámetros Geométricos	
Diámetro de campo modal 1550 nm	9.60±0.40 μ m
Área efectiva	65-72 μ m
Error concentricidad núcleo/cladding	≤ 0.6 μ m
Diámetro cladding	125.0±1.0 μ m
Error concentricidad coating/cladding	12 μ m
No circularidad cladding	$\leq 1.0\%$
Diámetro coating	247±7.0 μ m

TABLA. 3.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

La tabla 3.3 contiene los parámetros mecánicos y ambientales

Parámetros mecánicos y ambientales	
Radio de curvatura mínima	30 mm
Fuerza de pelado (F)	$1N \leq F \leq 3N$
Atenuación inducida por macrocurvatura a 1550nm	
1 vuelta sobre 32 mm	≤ 0.50 dB
100 vueltas sobre 50 mm	≤ 0.05 dB
-60°C ~+85°C	≤ 0.05 dB/Km
-10°C ~+85°C/ hasta 98%RH	≤ 0.05 dB/Km
+85°C+/- 2°C Calor seco	≤ 0.05 dB/Km
+23°C+/- 2°C Inmersión agua	≤ 0.05 dB/Km

TABLA. 3.3 PARÁMETROS MECÁNICOS Y AMBIENTALES

En TELMEX, las fibras ópticas son canalizadas y protegidas con un cierto recubrimiento, dependiendo si el enlace es subterráneo o aéreo. La empresa que se encarga de conjuntar una cantidad de fibras según la norma, es Condumex; construye el recubrimiento contra humedad, intemperie o algún otro agente que pueda dañar la estructura y propiedad de la fibra óptica. En la fig. 3.11 se muestra el cable de fibra óptica como finalmente se utiliza en campo.

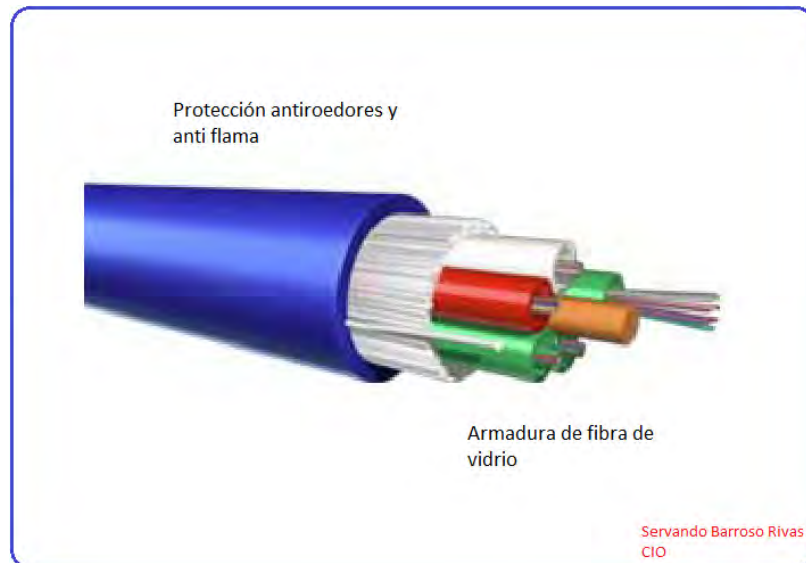


FIG. 3.11 ESTRUCTURA DE FIBRA ÓPTICA MONOMODO MARCA CONDUMEX.

Dentro del mismo estudio de la fibra óptica G.655, se realizó una foto microscópica de la sección transversal, la cual se muestra en la figura 3.12.

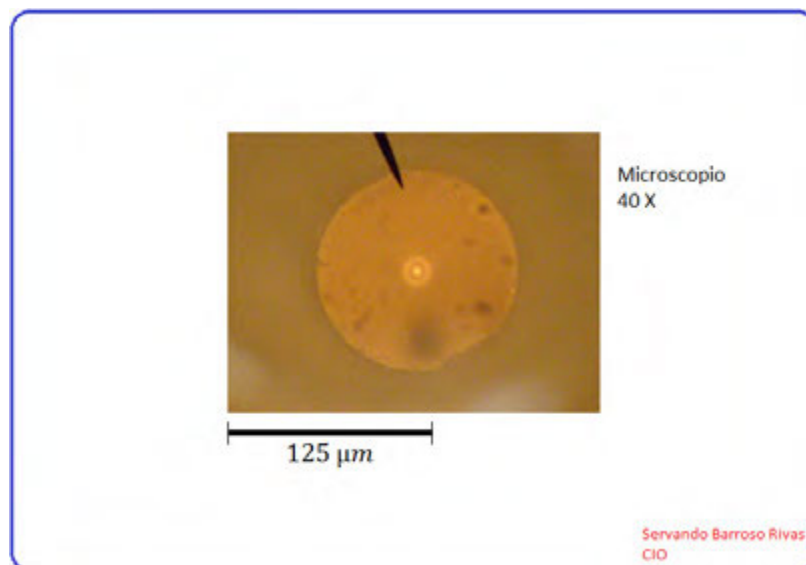


FIG. 3.12 FOTO MICROSCÓPICA DE LA SECCIÓN DE TRANSVERSAL DE FIBRA G.655

El arreglo experimental descrito por partes anteriormente, se muestra en la fig. 3.13. Por la cantidad de elementos y espacio del laboratorio, el emisor láser no se ubica en la foto.



FIG. 3.13 ARREGLO EXPERIMENTAL.

Dentro de los estudios de la fibra G.655, se realiza la medición de un tramo de fibra de 2 metros. Posteriormente, a la misma fibra óptica se corta aproximadamente en dos partes iguales de 1 metro. De la misma manera, se colocan ambas partes como elemento de prueba. Obteniendo las métricas correspondientes de cada una, considerando que la dirección de la luz sea la misma que para el tramo original. Al finalizar esta medición, con la ayuda de una empalmadora de fibra óptica, marca Fastcat Splicer, se hace el empalme de los dos tramos de fibra. Considerando el orden de la unión de forma original antes del corte, fusionando con la ayuda del equipo proporcionado por TELMEX, y colocando una manga (Smoov) para protección del empalme. En la figura 3.14, se muestra la empalmadora. En las figuras 3.15 se muestra el corte de la fibra para poder ser fusionado.



FIG. 3.14 EMPALMADORA FASTCAST SPLICER.

En la preparación de la fibra, es necesario realizar la misma operación de la peladora y la limpieza con etanol. Posteriormente, al realizarse el corte, ambas partes son colocadas sobre la empalmadora como lo muestra la figura 3.16.



FIG. 3.15 CORTE DE FIBRA



FIG. 3.16 COLOCACIÓN DE LA FIBRA Y PRE VISUALIZACIÓN DE PUNTAS DE FIBRA

En la figura 3.17 exhibe el momento de la fusión. La figura 3.18 muestra el resultado exhibido por la pantalla del equipo, y su atenuación (0.02 dB) del empalme, que es óptimo para la normativa establecida en TELMEX.



FIG. 3.17 MOMENTO DE LA FUSIÓN.

Después de ejecutar la fusión, el empalme de la fibra óptica es protegido por la manga y colocada por medio de calor, figura 3.19.

El empalme ya finalizado con su respectiva protección es mostrada por la figura 3.20



FIG. 3.18 FIBRA YA FUSIONADA CON SU PERDIDA ESTIMADA (0.02 dB).



FIG. 3.19 CALENTADOR PARA AJUSTAR LA MANGA AL EMPALME.

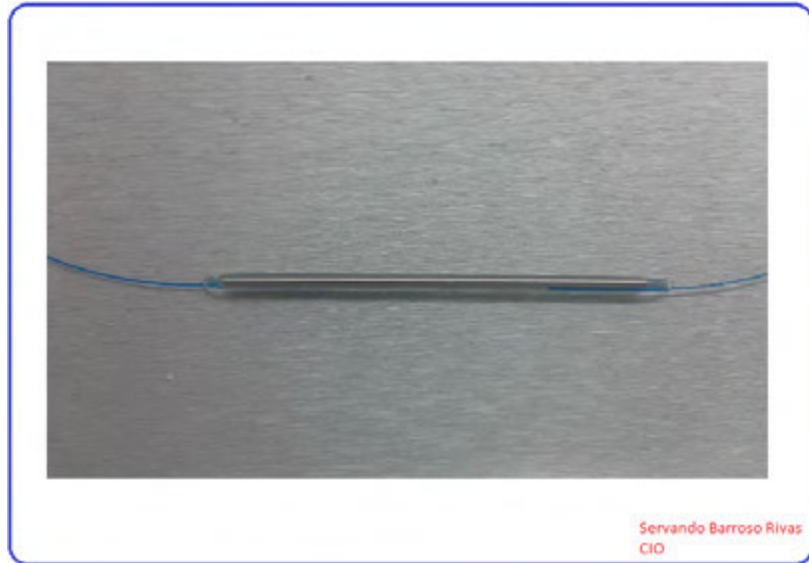


FIG. 3.20 EMPALME FINALIZADO.

También se optó por realizar una prueba, directamente al analizador, omitiendo el DPC (Generador de estados de polarización). Para poder realizar este experimento es necesario utilizar un conector mecánico tipo FC para ambos extremos. La fibra óptica que es conectada al DPC para alimentarlo con luz láser, se conecta en un extremo, y en el otro extremo se conecta la fibra óptica de prueba para suministrar la señal óptica al PSA. En la figura 3.21 se muestra el conector mecánico. Esto con el fin de verificar la consistencia entre la potencia generada por el láser y la analizada.



FIG. 3.21 CONECTOR MECÁNICO TIPO FC

Capítulo IV. Resultados y conclusiones

4.1 *Resultados.*

Los resultados del trabajo desarrollado en esta tesis se detallan en este capítulo, se analizan y se presentan las conclusiones de la respuesta de la fibra monomodo a los distintos estados de polarización incidentes.

Después de realizar las pruebas y las diferentes mediciones para cada fibra seleccionada, con una emisión láser a 1550 nm, se registraron los valores asociados a los parámetros de Stokes con el software comercial (Thorlabs), utilizando una lectura de 1024 puntos de muestreo, a 3.33 muestras por segundo. En las siguientes figuras se muestran las gráficas obtenidas, que manifiestan las respuestas de las fibras si se utilizaran todos los estados de polarización posibles para su transmisión. El cableado con el que se trabajó, contiene 24 fibras, distribuidas en 4 conjuntos de 6 fibras, codificados en 6 colores diferentes (rojo, azul, verde, naranja, amarillo y transparente). El fabricante reporta que las características ópticas entre ellas son idénticas.

Después de generar los archivos para cada uno de los 6 estados de polarización, fueron guardados en carpetas diferentes con el nombre de la fibra correspondiente. Los datos obtenidos son procesados en el ordenador, en un software comercial de nombre MatLab®, al cual se le asigna como función principal el cálculo de los valores numéricos y el graficado de algunas métricas escalares de despolarización, mostradas en el Capítulo II. La mayoría de los procesos matemáticos pueden ser generados numéricamente con este software y simplificados los resultados a una gráfica representativa del estudio.

El programa desarrollado por el asesor de este trabajo, el Dr. Rafael Espinosa Luna, realiza un procesamiento de los datos obtenidos. El programa determina experimentalmente y analiza las matrices de Mueller, utilizando el método de las 6 polarizaciones incidentes.

Los 1024 puntos obtenidos de los 4 parámetros de Stokes son leídos y promediados con funciones especiales desde el programa comercial (Thorlabs). Se determina la matriz experimental y se realizan los análisis sobre la matriz de Mueller normalizada. Con los 16 elementos que la conforman, se obtienen las métricas escalares ya descritas en el capítulo 2.

A continuación se muestra los valores numéricos de algunas métricas de despolarización escalares y las gráficas de las respuestas lineales obtenidas para diferentes fibras ópticas con las mismas características de fabricación. Algunas configuraciones de medición fueron diferentes con respecto a cortes y empalmes producidos sobre la fibra.

Para entender el fenómeno por el cual el haz polarizado transmitido cambia su estado original, es necesario tener una interpretación de los cambios en el estado de polarización a la salida de la muestra, como el grado de polarización emergente, DoP, en función de todos los estados de polarización incidentes posibles.

La primera fibra estudiada fue un trozo de 30 cm de longitud. Los valores representativos de las métricas calculadas son los que se muestran en la tabla 4.1, al igual que los valores numéricos de la matriz de Mueller y las gráficas en la figura 4.1, utilizando un valor de 0 grados para el acimut del analizador de estados de polarización, PSA, en todas las mediciones.

Roja 1					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación Total	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia Total	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.1026	0.1018
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0127	0.9977	2.9862	0.9965	0.0	0.0657

TABLA 4.1 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA ROJA 1, LONGITUD DE 30 CM.

Matriz de Mueller resultante [normalizada] para fibra con cubierta roja 1.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0938 & 0.2857 & 0.8854 & -0.3281 \\ -0.0396 & -0.4011 & 0.4435 & 0.8103 \\ 0.0127 & 0.8642 & -0.1337 & 0.4728 \end{bmatrix}$$

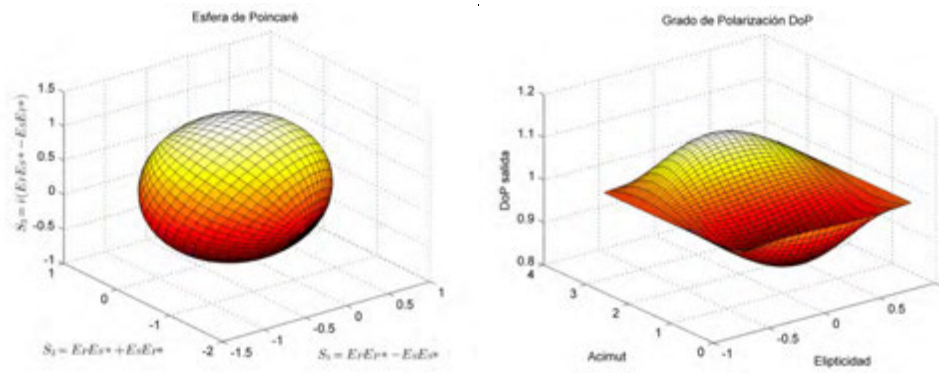


FIG. 4.1 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA ROJA.

Haciendo el análisis para la primera fibra óptica estudiada, de la tabla 4.1 puede observarse que no presenta diatenuación a la polarización incidente y que la polarizancia total es de un 10%, predominando en un orden de magnitud la lineal sobre la circular, lo que significa que tal fibra es capaz de polarizar parcialmente un haz no polarizado transmitido, en esta proporción, tendiendo a generar un estado de polarización ligeramente elíptico emergente. La métrica asociada al índice de despolarización DI, nos muestra un valor de 0.9977, por lo que se interpreta que la fibra despolariza un haz polarizado transmitido en un 0.33%. Si se considera que se está estudiando un tramo de 30 cm, ésta pérdida en el estado de polarización debe tomarse en cuenta cuando se planea su uso para comunicaciones a mayores distancias.

Para la métrica $Q(M)$, esta característica es muy importante en el análisis para emplearse como un primer criterio, confiable, para identificar métricas de Mueller físicamente consistentes [26]. Además de que puede emplearse como criterio para identificar unívocamente matrices de Jones no diatenuantes; esto es, sistemas asociados a retardadores o desfasadores puros [27]. Para este caso, el valor asociado a $Q(M)$ es de 2.9862, que se interpreta como asociado a un sistema despolarizante y no diatenuante. La condición de la traza, o teorema de Gil-Bernabeu, tiene asociado un valor de 0.9965, que se interpreta como que en esa aproximación de matriz de Mueller asociada a la fibra no puede obtenerse a partir de una matriz de Jones, en un sentido estricto, porque se presenta una ligera (no despreciable) despolarización. Finalmente, el Grado de Anisotropía anisotrópico, Add, brinda un valor de 0.0657, lo que significa que la fibra no despolariza de manera uniforme todos los estados de polarización transmitidos, pues hay algunos que despolariza más que otros (en la gráfica 4.1 para el DoP se puede apreciar esta tendencia). Se puede concluir que las métricas DI, $Q(M)$, Traza y Add, muestran

resultados consistentes entre sí, que indican que esta fibra tiende a despolarizar la luz polarizada transmitida, así como también a polarizar ligeramente elíptica y de manera parcial la luz no polarizada incidente durante su transmisión. Las pérdidas dependientes de la polarización, PDL, se asocian a procesos de absorción y esparcimiento dependientes del estado de polarización incidentes. En este caso, no se registran pérdidas en la transmisión, aún cuando los estados de polarización sufren una ligera afectación en su estado de polarización (unas polarizaciones cambian a otras y otras se despolarizan).

La forma de la matriz de Mueller también brinda información general sobre las características de la fibra. Por ejemplo, muestra directamente que la diatenuación es cero (últimos tres elementos de la primera fila), que existe polarizancia (últimos tres elementos de la primer columna), predominantemente lineal (segundo y tercer elementos de la primer columna), que existe birrefringencia y que genera despolarización. Los valores asociados a la misma, son los utilizados para calcular tanto los valores de las métricas como para generar las gráficas mencionadas en el siguiente párrafo.

Las gráficas de la figura 4.1 se asocian a la respuesta de la fibra a todos los estados de polarización incidentes (esfera de Poincaré), así como el grado de polarización emergente, DoP, respectivamente (izquierda a derecha). Se aprecia una rotación de los ejes polares de la esfera de Poincaré, lo que se interpreta como la existencia de birrefringencia en la fibra, además de que la pequeña deformación de la esfera indica la presencia de despolarización ante ciertos estados de polarización incidentes.

Muy probablemente la primera fibra sufrió algún tipo de tensión al momento de hacer las mediciones.

Las siguientes tres tablas (4.2, 4.3 y 4.4) y tres figuras (4.2, 4.3 y 4.4) muestran los resultados para tres fibras considerando una longitud de 1 m para cada una de ellas (con cubiertas roja, transparente y verde, respectivamente). Se puede apreciar que todas ellas se comportan de forma similar con respecto a los valores proporcionados por las métricas y las fibras que se mostraron con anterioridad.

La diferencia que se muestran en estas tres fibras ópticas con una longitud aproximada de 1m, probablemente se deba a la ubicación del eje de propagación de la fibra respecto a la iluminación incidente. Otra característica importante es la longitud de batido (length beat) para cada fibra óptica, pues esta longitud puede

variar en rangos de milímetros (pues las fibras tienen una longitud aproximada de 1m).

ROJA 1 M					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación Total	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia Total	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.0102	0.0066
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0078	0.9999	2.9996	0.9999	0.0	0.0056

TABLA. 4.2 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA ROJA 1 M

Matriz de Mueller resultante (normalizada) para fibra con cubierta ROJA

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0052 & 0.7133 & -0.6815 & -0.1398 \\ -0.0040 & 0.2999 & 0.4828 & -0.8301 \\ 0.0078 & 0.6333 & 0.5498 & 0.5396 \end{bmatrix}$$

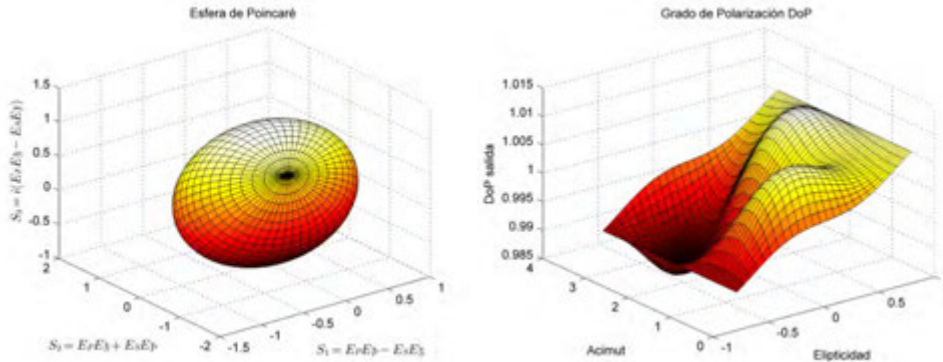


FIG. 4.2 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA ROJA DE 1 M.

TRANSPARENTE 1 M					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.0401	0.0401
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0016	0.9997	2.9984	0.9996	0.0	0.0035

TABLA. 4.3 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA TRANSPARENTE 1 M.

Matriz de Mueller resultante (normalizada) para Fibra con cubierta
TRANSPARENTE

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0082 & 0.0457 & 0.9951 & -0.0809 \\ 0.0393 & 0.0510 & 0.0775 & 0.9954 \\ -0.0016 & 0.9968 & -0.0472 & -0.0508 \end{bmatrix}$$

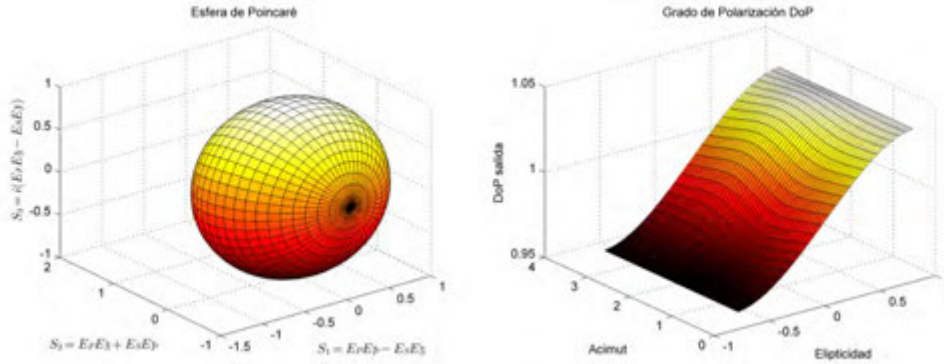


FIG. 4.3 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA TRANSPARENTE DE 1 M.

VERDE 1 M					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación Total	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia Total	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.0188	0.0186
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0027	0.9999	2.9995	0.9999	0.0	0.0118

TABLA. 4.4 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA VERDE 1 M.

Matriz de Mueller resultante (normalizada) para fibra con cubierta VERDE

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0181 & 0.0500 & 0.9932 & -0.1044 \\ 0.0043 & 0.3740 & 0.0777 & 0.9204 \\ -0.0027 & 0.9259 & -0.0859 & -0.3762 \end{bmatrix}$$

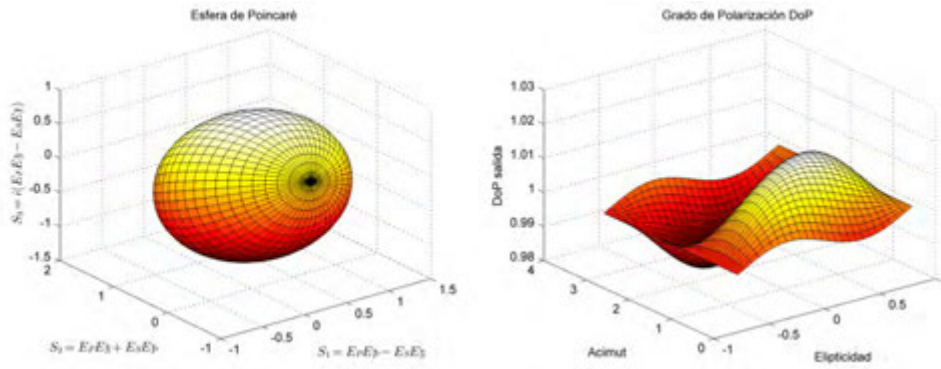


FIG. 4.4 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA VERDE DE 1 M.

El análisis de las tres fibras muestra que, aún cuando se considera que fueron fabricadas de la misma manera, quizás el manejo de sus recubrimientos (realizado por Condumex) o la manera en que en el laboratorio se operó para retirarlos, afectó ligeramente su comportamiento, pues no se obtienen las mismas respuestas polarimétricas para las mismas. Por ejemplo, la fibra con cubierta transparente, tiende a despolarizar un poco más que las otras dos, pero de manera uniforme todos los estados despolarizan (por su menor valor asociado a la métrica Add). Puede constatarse que las fibras con cubiertas roja y verde, respectivamente, pueden ser descritas por el formulismo de Jones, pues prácticamente no presentan despolarización, según sus valores asociados al índice de despolarización, DI, la métrica Q(M) y el teorema de la traza o de Gil-Bernabeu. De manera similar a la fibra de 30 cm de longitud, éstas de un metro de largo tampoco presentan pérdidas en su transmisión debidas a la polarización.

Se realizó la medición de un tramo de 2 metros para, posteriormente, hacer un corte a un metro de longitud, y generar un empalme y verificar su comportamiento polarimétrico, obteniendo los resultados que se muestran en las tablas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, así como las gráficas correspondientes en las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8. Este ejercicio se efectuó con el objetivo de conocer cómo se modifica la respuesta polarimétrica de este tipo de fibras ante los empalmes que usualmente utiliza la empresa TELMEX.

Fibra con cubierta Azul de 2 m					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación total	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia Total	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.0703	0.0673
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0204	0.9980	2.9882	0.9970	0.0	0.0550

TABLA. 4.5 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA AZUL 2 M.

Matriz de Mueller resultante (normalizada) para fibra con cubierta azul de 2 m

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0200 & -0.3167 & 0.3551 & 0.8148 \\ -0.0642 & 0.1948 & -0.8608 & 0.5257 \\ 0.0204 & 0.9256 & 0.3551 & 0.2338 \end{bmatrix}$$

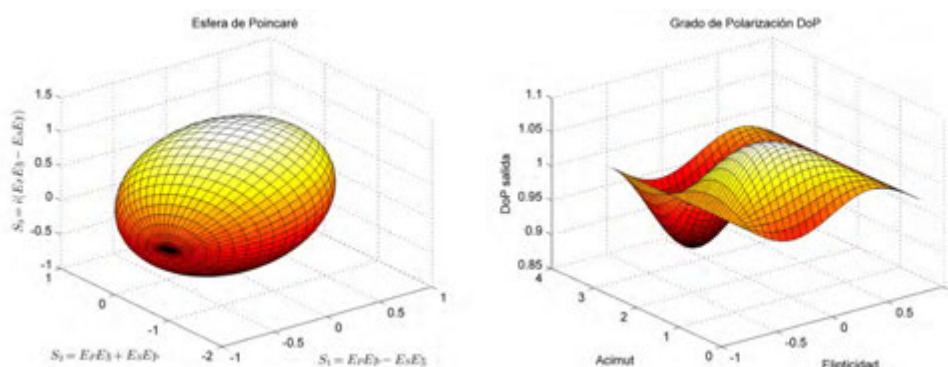


FIG. 4.5 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA AZUL DE 2 M.

Fibra con cubierta Azul de 2 m. Corte 1 m tramo A					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación Total	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia Total	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.0735	0.0730
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0086	0.9991	2.9948	0.9987	0.0	0.0495

FIG. 4.6 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA CORTE 1 M TRAMO A.

Matriz de Mueller resultante (normalizada) para fibra con cubierta azul de 2 m.
Corte 1 metro tramo A

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0401 & 0.1174 & -0.5351 & -0.7893 \\ 0.0610 & 0.2140 & 0.8410 & -0.5627 \\ -0.0086 & 0.9670 & -0.0787 & 0.2353 \end{bmatrix}$$

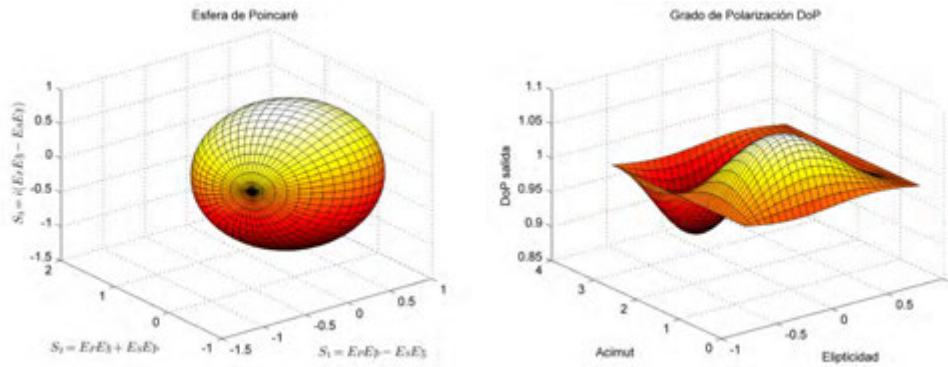


FIG. 4.6 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA AZUL DE 2 M. TRAMO A

Fibra con cubierta Azul de 2 m. Corte 1 m tramo B					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación Total	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia Total	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.1778	0.1741
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0359	0.9853	2.9125	0.9781	0.0	0.0995

TABLA. 4.7 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA CORTE 1 M TRAMO B.

Matriz de Mueller resultante (normalizada) para fibra con cubierta azul de 2 m.
Corte 1 metro tramo B

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0174 & 0.0710 & -0.5619 & -0.7686 \\ 0.1733 & -0.1921 & 0.7731 & -0.5852 \\ 0.0359 & 0.9625 & 0.2520 & -0.0490 \end{bmatrix}$$

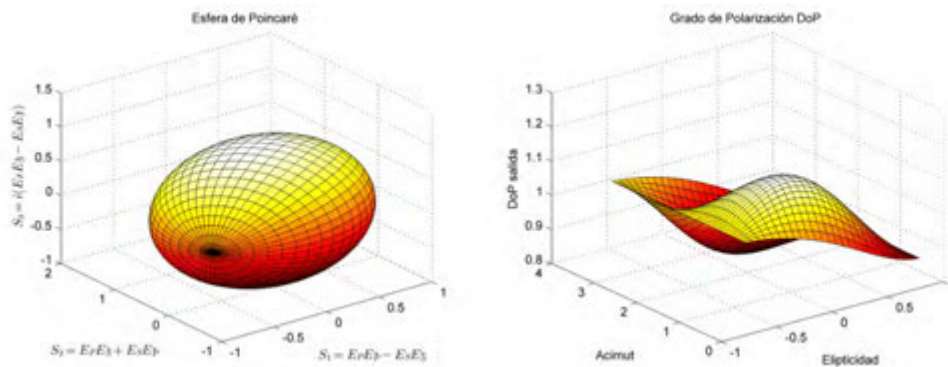


FIG. 4.7 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA AZUL DE 2 M. TRAMO B

Fibra con cubierta Azul de 2 m. Empalme (0.02dB)					
λ Lambda	$D(M)$ Diatenuación Total	$DL(M)$ Diat. Lineal	$DC(M)$ Diat. Circular	$P(M)$ Polarizancia Total	PL Pol. Lineal
1550 nm	0.0	0.0	0.0	0.0890	0.0867
PC Pol. Circular	DI Índice de Despolarización	$Q(M)$ M. escalar Despolarización	Tr Traza	PDL Pérdida Dep. de Pol.	Add Grado de Anisotropía
0.0202	0.9990	2.9942	0.9986	0.0	0.0465

FIG. 4.8 MÉTRICAS OBTENIDAS. FIBRA CON EMPALME.

Matriz de Mueller resultante (normalizada) para fibra con cubierta azul de 2 m.
Empalme (0.02 dB)

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0791 & -0.0981 & -0.5190 & -0.8452 \\ 0.0354 & 0.3167 & 0.7936 & -0.5212 \\ -0.0202 & 0.9392 & -0.3136 & 0.1037 \end{bmatrix}$$

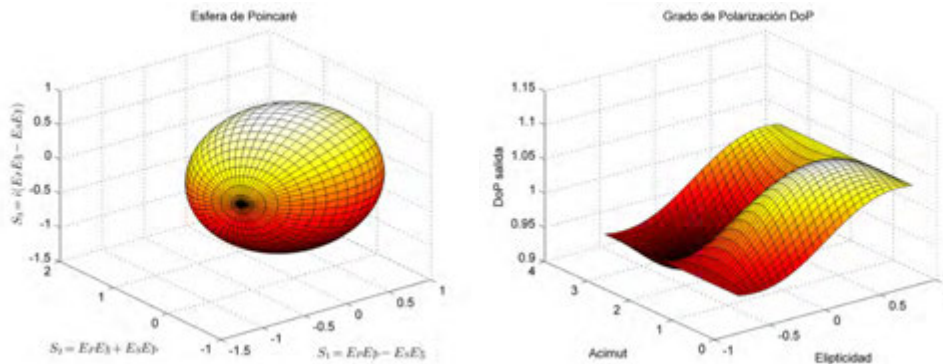


FIG. 4.8 GRÁFICAS DESCRIPTIVAS DE LA INTERACCIÓN DE LUZ POLARIZADA CON LA FIBRA ÓPTICA CON CUBIERTA AZUL DE 2 M. EMPALME (0.02 dB)

Es interesante el análisis de los resultados anteriores. Bajo condiciones de fabricación y manejo del empalme ideales, sería de esperarse resultados muy cercanos entre el primer y el último caso; esto es, entre la fibra original de 2 m (tabla y figuras 4.5) de longitud y en empalme entre sus dos mitades (tabla y figuras 4.8). Los resultados aquí presentados justamente eso muestran, pues los valores asociados a la polarizancia total, al índice de despolarización, a la métrica $Q(M)$, a las pérdidas debidas a la polarización y a la anisotropía de despolarización presentan apenas desviaciones del orden de un 1%. ¿Por qué entonces sus mitades muestran diferencias entre sí y respecto al sistema original y al de su empalme con el tramo A? Por ejemplo, el tramo B es quien muestra la

mayor despolarización (cercana a un 3.2 %). Quizás la respuesta está en la calidad de los cortes realizados al tramo B, que fueron corregidos al realizar el empalme (dada su alta calidad), pues se registraron pérdidas de solo 0.02 dB.

La esfera de Poincaré está rotada de la misma manera para los cuatro casos. Por lo que la birrefringencia es la misma sin importar un corte o empalmes realizados a lo largo del enlace de fibra.

Para el caso de las gráficas obtenidas para la fibra óptica que sufrió una fusión (empalme), muestra una clara dependencia de los estados de polarización incidentes y que son mayores para estados de polarización lineales, además muestra un pequeño ruido óptico, pues registra valores mayores a 1.

Dentro de la atenuación que el fabricante de las fibras estudiadas reporta, es un valor de 0.22 dB/km, utilizando este valor, y considerando que el equipo DPC puede entregar una potencia máxima de 15 dBm ($\approx 32 \text{ mW}$), con respecto a los enlaces que se utilizan en TELMEX el valor promedio es de 50 km a 100 km. El enlace considerado en loop, tiene una distancia de 78.8km (loop 157.6 km), se puede calcular la potencia que estaría a la salida del loop y pudiese ser detectada por el analizador.

Utilizando la fórmula siguiente:

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (4.1)$$

Donde dB (decibelio) es la unidad de atenuación y se usa para comparar dos niveles de potencia, P_i la potencia de entrada y P_o la potencia de salida.

En comunicaciones ópticas la atenuación se expresa en decibelios por unidad de longitud según:

$$\alpha_{dB} L = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (4.1)$$

Donde α_{dB} es la atenuación por unidad de longitud dB/km y L es la longitud de la fibra en km.

Utilizando los valores que nos ofrecen los fabricantes de los equipos utilizados y despejando P_o que es la potencia de salida se obtiene,

$$P_o = \frac{P_i}{e^{((\alpha_{dB}L)/10)}} \quad (4.2)$$

$$P_o = \frac{15dBm}{exp((0.22dB/km \cdot 157.6km)/10)} = 0.005 dBm$$

$$P_o = 0.005 dBm = 1.0011 \mu W$$

Considerando un valor máximo de potencia en el haz incidente sobre la fibra óptica, se obtendrá a la salida un haz emergente de luz con una potencia de $P_o = 0.005 dBm = 1.0011 \mu W$. La cual será censada por el analizador de estados de polarización.

4.2 Conclusiones

Se realizó de forma experimental el análisis polarimétrico mediante el formulismo matricial de Mueller-Stokes en una fibra óptica comercial marca Corning tipo **NZ-DSF G.655**, cuyas características se describen en el capítulo III. Este tipo de fibra es utilizada en enlaces de larga distancia en la red de TELMEX y que son parte de los anillos de interconexión.

En este análisis se utilizó el método de 6 mediciones para obtener la respuesta polarimétrica de las fibras. Este análisis lleva a la conclusión de que existen diferencias entre las fibras y que éstas dependen sensiblemente de su manejo, tanto durante su encapsulado como en su manejo controlado en el laboratorio. Que los efectos de despolarización y la pérdida del grado de polarización, aún cuando tienen valores pequeños, dependen principalmente de los estados de polarización lineales, y que no existe diatenuación en este tipo de fibra.

Los estados de polarización circulares para esta fibra estudiada, tiene un menor efecto sobre la despolarización y sobre el grado de polarización.

Es importante mencionar que las fibras utilizadas cumplen con los parámetros establecidos por ITU, mismo que se encarga de establecer las normas estandarizadas en comunicaciones. Por lo que es necesario realizar experimentos de este tipo, para enlaces de longitudes convencionales para anillos de comunicación utilizando fibras con longitudes cercanas a las utilizadas comercialmente, pues se ha demostrado en este trabajo que la presencia de pequeños efectos, pueden resultar en mayores efectos para esas dimensiones.

Los efectos de polarización incidentes sobre las fibras dependen de ciertos parámetros físicos de cada fibra óptica estudiada, tales como el eje principal de propagación, el cual afecta directamente a la birrefringencia, al grado de polarización y la polarización total, por lo que un mejor control en su posicionamiento y manejo, pudiera significar mejoras en sus respuestas polarimétricas.

4.2 ***Trabajo a futuro***

Después de realizar el análisis del comportamiento polarimétrico de fibras, una de las vertientes que se puede estudiar es en enlaces físicos ya instalados, considerando las condiciones ambientales extremas, longitudes de gran escala y empalmes ocasionados por accidentes sobre la infraestructura de la línea.

Dentro de TELMEX, los equipos de transmisión de datos, utilizan otras fibras ópticas con diferentes características, por lo que es importante considerar un estudio total, de todas las redes externas e internas de esta empresa.

Parte de un mejor estudio y caracterización polarimétrica, sería el utilizar otras longitudes de onda, donde posiblemente se puede encontrar información y ventajas para las telecomunicaciones en fibra óptica en función de los posibles estados de polarización incidentes.

En TELMEX, como en cualquier empresa de comunicaciones ópticas, un factor muy importante es el análisis de la dispersión por el modo de polarización, PMD, el cual sería importante determinar su respuesta al tratar de involucrarlo con un análisis polarimétrico estudiado en este trabajo.

Bibliografía

- [1] Karla M. Salas-Alcántara, R. Espinosa-Luna, I. Torres-Gómez. "Polarimetric Mueller-Stokes analysis of photonic crystal fibers with mechanically induced long-period gratings". *Opt. Eng.* **51(8)**, 085005 (2012).
- [2] Eugene Hecht and Alfred Zajac, "Optics", Third Edition, Addison-Wesley (2001).
- [3] Dennis Goldstein, "Polarized Light", Second Edition. Marcel Dekker (2003).
- [4] Grant R. Fowles, "Introduction to Modern Optics", Reinhart & Winston, New York (1989).
- [5] C. Brosseau, "Fundamentals of Polarized Light: A Statistical Optics Approach", Wiley, New York (1998).
- [6] Max Born, Emil Wolf, "Principle of optics". Seventh Edition, Cambridge University (1999).
- [7] Hiroyuki Fujiwara, "Spectroscopic Ellipsometry, Principles and Applications", John Wiley & Sons, Ltd (2007).
- [8] S.Y. Lu, R.A. Chipman, "Mueller matrices and the degree of polarization", *Opt. Commun.* **146**, 11–14 (1998).
- [9] J. J. Gil and E. Bernabeu, "A depolarization criterion in Mueller matrices," *Opt. Acta* **32(3)**, 259–261 (1985).
- [10] Rafael Espinosa Luna, Eusebio Bernabeu, Gelacio Atondo Rubio, "Q(M) and the depolarization index scalar metrics", *Appl. Opt.* **47**, 1575-1578 (2008).
- [11] R. Espinosa-Luna and E. Bernabeu, "On the Q(M) depolarization metric," *Opt. Commun.* **277(2)**, 256–258 (2007).

Bibliografía

- [12] Rafael Espinosa-Luna, E. Bernabeu, G. Atondo-Rubio and S. Hinojosa-Ruíz, "A simple depolarization criterion for light", *Optik*, **122**, pp. 407-410 (2011).
- [13] M.C. I. Saucedo-Orozco, "Aplicaciones polarimétricas para la identificación de adulteraciones en la miel de abeja", Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., tesis de maestría en Óptica (2012).
- [14] Edward Collett, "Field Guide to Polarization", SPIE, Bellingham, Washington USA (2009).
- [15] T. A. Eftimov, W. J. Bock, J. Chen, P. M. Mikulic, "Mueller-Stokes analysis of long-period gratings part I: uniformly birefringent LPFGs," *J. Lightwave Tech.* **27(17)**, 3752–3758 (2009).
- [16] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", Third Edition, Wiley-Interscience (2002).
- [17] H.H. Cerecedo-Nuñez, A. Sánchez-Martínez, P. Padilla-Sosa y G. Rodríguez-Zurita "Revisión y análisis experimental de modos LP_{nm} en fibras ópticas" *Rev. Mex. Fís.*, **E55(1)**, 15-20 (2009).
- [18] S. E. Miller and Ivan P. Kaminov (Editores), "Optical fiber telecommunications II", Academic Press, John Wiley & Sons, Ch. 5, (1988).
- [19] John M. Senior, "Optical fiber communications. Principles and practice", Prentice Hall, 2nd Ed, Ch. 1 (1992).
- [20] Carlos Llorente, "Estudio y diseño de multiplexores por división en longitud de onda (WDM)", Tesis Doctoral, Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid (1997).
- [21] R. Espinosa-Luna, G. Atondo-Rubio, S. Hinojosa-Ruiz, "Dealing depolarization of light in Mueller matrices with scalar metrics", *Optik*, **121**,1058-1068 (2010).
- [22] Anritsu, Tunics Plus, Specifications of Tunable Laser.

Bibliografía

[23] Thorlabs Instrumentation, Operation Manual, Deterministic Polarization Controller DPC5500, 2008, Version 2.12.

http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=930

[24] Thorlabs Instrumentation, Operation Manual, Polarization Analyzing System, PAX5710/PAX5720 (VIS/IR1/IR2/IR3), 2008, Version 1.5.

http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1564

[25] Fibra óptica LEAF de Corning, Información de producto, CORNING®.

http://gaem.tlc.unipr.it/gestione/userfiles/File/Cucinotta/datasheet_LEAF.pdf

[26] R. Espinosa-Luna, S. Hinojosa-Ruiz, G. Atondo-Rubio, “Manejo e interpretación polarimétrica de las matrices de Mueller”, Rev. Mex. Fís. **55 (3)**, 201-210 (2009).

[27] R. Espinosa-Luna, G. Atondo-Rubio, O. J. Velarde-Escobar, “Métrica de despolarización escalar $Q(M)$ como criterio para identificar sistemas retardadores o desfases puros”, Rev. Mex. Fís. **56 (5)**, 406-410 (2010).

[28] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara, “Ellipsometry and Polarized Light”, North-Holland, Amsterdam (1989).

[29] G. Atondo-Rubio, R. Espinosa-Luna, A. Mendoza-Suárez, “Mueller Matrix Determination for one dimensional rough surfaces with a reduced number of measurements”, Opt. Commun, **244**, 7-13 (2005).

[30] Guadalupe López Morales, “Caracterización óptica del ámbar de Chiapas. Diseño y construcción de una prototipo experimental para la autenticación del ámbar”, Centro de Investigaciones en Óptica A. C., tesis de maestría en Optomecatrónica (2012).

[31] Miguel Angel Chárraga Villanueva, “Manuales para capacitación de técnicos de TELMEX”, INTELMEX (2006).