

XX(79889.1)



CINVESTAV - IPN

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Unidad Guadalajara



CONTROL DEL ESTADO DE POLARIZACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO

**CINVESTAV I.P.N.
SECCION DE INFORMACION
Y DOCUMENTACION**

**TESIS QUE PRESENTA
MARGARITA FRANCO GARCÍA**

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

**EN LA ESPECIALIDAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Guadalajara, Jal. Julio de 1999

CLASIF.:	
ADQUIS.:	TESIS-1999
FECHA:	14-X-99
PROCED.:	Depto. Ser.
	\$

Bibl.

CONTROL DEL ESTADO DE POLARIZACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO

**Tesis de Maestría en Ciencias
Ingeniería Eléctrica**

Por:

Margarita Franco García

Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica
Universidad de Guadalajara, 1991-1996

Becario del CONACYT, expediente no. 112944

Directores de Tesis:

**Dr. Arturo Veloz Guerrero
Dra. Gabriela María Ruiz Soto**

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Julio de 1999.

*A mis padres **María Antonia** y **Salvador**, a mis hermanos **Mario**, **Ana Bertha**, **Ana Leticia** y **Fernando**; así como a mi esposo **Saúl** y a mi sobrina **Circe**, a quienes dedico mi esfuerzo.*

Agradecimientos:

A mis asesores

Dr. Arturo Veloz Guerrero
Dra. Gabriela María Ruiz Soto

A los miembros de mi comité de tesis

Dr. Arturo Veloz Guerrero
Dr. Deni Librado Torres Román
Dr. José Luis Ramos Quirarte

**A BNeD Broadband Network Design, Inc., por el préstamo del software
*BroadNeD***

Índice

Pág.

Capítulo 1

Descripción del trabajo

1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Metodología del trabajo	2
1.4 Estructura del trabajo	2

Capítulo 2

Definición de conceptos, elementos y formas de control del estado de polarización (EDP)

2.1 Polarización de la luz	4
2.1.1 EDP (estado de polarización) lineal	6
2.1.2 EDP circular	6
2.1.3 EDP elíptico	7
2.2 Dispositivos ópticos	9
2.2.1 Polarizador lineal	9
2.2.2 Retardador lineal	9
2.3 Fibras ópticas	10
2.3.1 Polarización en fibras ópticas monomodo	13
2.3.2 Modulación por polarización	14
2.4 Descripción de sistemas para el control del EDP	14

Capítulo 3

Herramientas para el análisis del EDP y elementos del sistema

3.1 Vector de Stokes	17
3.2 Matrices de Mueller	18
3.3 Esfera de Poincaré	20
3.4 Métodos de medición	22

Capítulo 4

Dispositivos físicos del sistema

4.1 El objetivo de microscopio (M-20X)	27
4.2 Polarizador dicróico (03 FPG 007)	28
4.3 El retardador de $\lambda/4$ (02 WRM 019)	29
4.4 Fibra óptica (F-SV)	30
4.5 Láser (05-LHP-111)	31
4.6 Medidor de potencia (1815-C)	31

Capítulo 5

Resultados obtenidos en el sistema con los métodos de medición y con el controlador de polarización (CP) a distintos estados de polarización

5.1 Algoritmo para el cálculo de los ángulos del controlador de polarización (CP)	35
5.2 Comparación de los resultados obtenidos con los cinco métodos para generar el vector de <i>Stokes</i>	37
5.3 Mediciones	39
5.3.1 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 90° y 0°	41
5.3.2 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 45° y -45°	43
5.3.3 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 20° y -70°	44
5.3.4 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 70° y -20°	46

Capítulo 6

Sistema simulado y resultados logrados en él

6.1 Sistema simulado	48
6.2 Ejemplo del manejo de la esfera de <i>Poincaré</i>	49
6.3 Datos obtenidos con el software	51
6.3.1 EDP lineal con $\alpha=0^\circ$ y $\alpha=90^\circ$	51
6.3.2 EDP lineal con $\alpha=-70^\circ$ y $\alpha=20^\circ$	55
6.3.3 EDP lineal con $\alpha=-40^\circ$	58
6.3.4 EDP lineal con $\alpha=-80^\circ$	60

Capítulo 7

Análisis de los resultados y conclusiones

7.1 Análisis de los resultados	62
7.2 Comparación de resultados	62
7.3 Observaciones	63
7.4 Conclusiones	64
7.5 Trabajo futuro	64
Anexo A “Polarización en fibras ópticas monomodo”, artículo publicado en la 4ª Conferencia de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, México D. F. (1998).	65
Referencias	72

Glosario

EDP	Estado de polarización
I	Intensidad total (en vector 3.1)
Q	Diferencia de las intensidades de los componentes x y y (en vector 3.1)
U	Diferencia de las intensidades de los componentes con $\alpha=45^\circ$ y $\alpha=-45^\circ$ (en vector 3.1)
V	Diferencia de las intensidades de los componentes circulares derecha e izquierda (en vector 3.1)
e	Elipticidad
α	Azimut
CP	Controlador de polarización
LP	Linealmente polarizado
PolSK	<i>Polarization Shift Keying</i>
DPolSK	<i>Differential Polarization Shift Keying</i>
PMF	<i>Polarization Maintaining fibers</i>
CT	Coefficiente de transmisión

Capítulo 1

Descripción del trabajo

1.1 Introducción

El estado de polarización (EDP) es una característica de la luz que en telecomunicaciones tomó importancia con la cuarta generación de sistemas ópticos [1], conocidos como sistemas ópticos coherentes en los cuales se aprovechan de alguna manera las características del campo eléctrico de la señal que se transmite (amplitud, frecuencia, polarización, fase). La ventaja más grande del modo coherente de recepción con respecto a la detección directa (*Direct Detection*) es que permitió la utilización de un mayor ancho de banda del canal óptico (fibra óptica) a través del multiplexaje por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), llamada también multiplexación por división de frecuencia óptica (OFDW, *Optical Frequency Division Multiplexing*). El problema que se presentó entonces fue que el EDP de la luz que se transmitía cambiaba de manera aleatoria en su recorrido por la fibra monomodo convencional, por lo que se hizo necesario el control de esta propiedad de la señal antes de su llegada al receptor ya que el EDP de la luz a la salida de la fibra y el EDP del láser oscilador localizado en el receptor deben ser iguales. Para lograr el control del EDP inicial de la señal se cuenta ahora con varias formas, que se discutirán en el siguiente capítulo y de las cuales se tomó al controlador de polarización (CP) específicamente a los discos giratorios [2] como parte fundamental de este trabajo.

Para poder determinar qué EDP posee la luz se utilizan polarímetros los cuales están clasificados en dos categorías: Polarímetros por división de amplitud (DOAP, *Division of Amplitude Polarimeters*) y Polarímetros por división de frente de onda (DOWP, *Division of Wavefront Polarimeters*), la descripción de la forma de operación de estos dispositivos se puede encontrar en [3]. Existen además otros equipos [4] como el analizador de espectro óptico, el reflectómetro óptico en el dominio del tiempo, etc. que se usan para medir diferentes parámetros (atenuación, dispersión, perfil del índice de refracción, reflexión, entre otros) de las fibras ópticas. Debido a que no se contaba con un polarímetro fue necesario realizar las mediciones modificando para ello el arreglo que se expondrá posteriormente siguiendo alguno de los métodos que se describirán y compararán como parte importante también de esta tesis.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis es recuperar en la salida de la fibra óptica monomodo común el EDP de la luz acoplada al otro extremo de la fibra (entrada) debido a que éste es modificado aleatoriamente al propagarse a través de ella.

1.3 Metodología de trabajo

Para cumplir con el propósito de esta tesis se llevó el siguiente procedimiento:

- Estudio de algunos capítulos de la tesis “*A division of wavefront polarimeter and optical analysis of red blood cells*” [3], así como de artículos y libros de temas relacionados con controladores de polarización y con técnicas para la medición del EDP.
- Selección del método para la recuperación del EDP.
- Programación del algoritmo para el cálculo de los ángulos de los elementos que componen al CP.
- Diseño, construcción y prueba del CP.
- Verificación y comparación de algunos métodos para la caracterización de estados de polarización.
- Utilización de un software comercial para comparar los resultados obtenidos en la práctica, al emplear el CP que se implementó, con los producidos en simulación.

1.4 Estructura del trabajo

El material se organizó en siete capítulos, incluyendo éste como el primero y siguiendo la secuencia que se establece a continuación.

En el capítulo dos se define el EDP, la fibra óptica monomodo común, además del efecto que ésta provoca al mismo. Se describe también brevemente a los elementos ópticos que se utilizaron ya sea para la caracterización del EDP o para el control del

mismo, se finaliza este capítulo con una descripción de las distintas formas y medios para la recuperación del EDP, profundizando en el que se adoptó en este trabajo. En el capítulo tres se tratará el tema de la representación matemática de los elementos vistos en el capítulo dos. Se detallan también algunos métodos para la caracterización del EDP.

En el cuarto capítulo se describen las características de los elementos del sistema físico, real, en el que tuvieron lugar todas nuestras mediciones, resultados e implementaciones.

En el capítulo cinco se muestra el algoritmo del código para el cálculo de los ángulos de los elementos que conforman al CP, reportamos también algunas de las mediciones realizadas en nuestro sistema y hacemos una breve comparación de los métodos para la determinación del EDP descritos en el capítulo tres.

El tema que ocupa el capítulo seis es un software alemán de simulación de redes ópticas (*BroadNeD*) que fue prestado al CINVESTAV por tres meses. En este programa se construyó un controlador del EDP (con elementos externos a la fibra) con el fin de comparar los resultados que se obtienen en el software con los que se observaron en el sistema real.

Finalmente, exponemos en el capítulo siete las observaciones y conclusiones de todo el trabajo realizado para la elaboración de esta tesis.

Capítulo 2

Definición de conceptos, elementos y formas de control del estado de polarización (EDP)

2.1 Polarización de la luz

De acuerdo con *Maxwell*, la luz es una onda electromagnética, caracterizada por un EDP y una frecuencia f o longitud de onda λ relacionadas por $f(1/s)\lambda(m)=c(m/s)$, donde λ es la distancia que recorre una onda en un periodo (ver figura 2.1). En este criterio de onda electromagnética existe un campo oscilante eléctrico y uno magnético, ambos a la misma frecuencia pero orientados perpendicularmente uno con respecto del otro; en la mayoría de las aplicaciones se consideran sólo las componentes del campo eléctrico de la luz debido entre otras razones a que el efecto de redistribución de cargas en la luz al incidir ésta en objetos (moléculas) [5] es mucho más grande en el campo eléctrico que en el magnético, además de que la corriente magnética es una fuente ficticia por lo que su sentido es sólo matemáticamente conveniente en las ecuaciones de *Maxwell* [6].

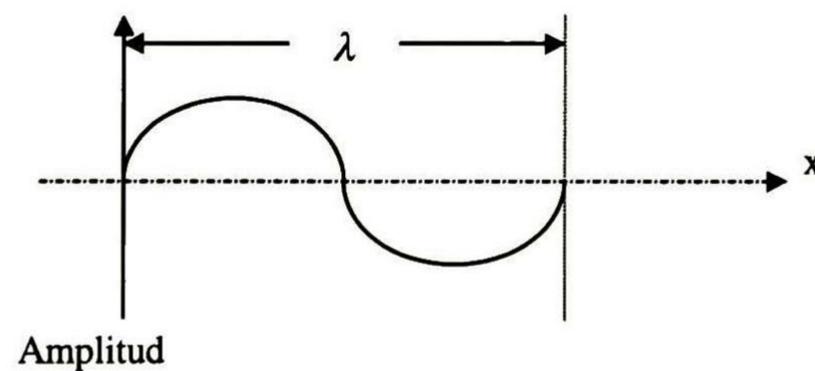


Figura 2.1. Longitud de onda y periodo

Ahora bien, el EDP de una onda electromagnética es la propiedad que describe la orientación, es decir la dirección y amplitud variantes en el tiempo del vector de campo eléctrico, mismo que para luz monocromática es:

$$E = E_x + E_y \quad (2.1)$$

con:

$$E_x = E_x^0 \text{sen}[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} \quad (2.1a)$$

$$E_y = E_y^0 \text{sen}[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \quad (2.1b)$$

donde:

ϕ_0 es una constante que indica la fase

$\omega=2\pi\nu$, ν es la frecuencia

E_x^0, E_y^0 son las amplitudes máximas del campo eléctrico

$k=2\pi/\lambda$, k es el número de onda

i y j son los vectores unitarios en los ejes x y y respectivamente

Asumiendo que la propagación de la luz es en la dirección z entonces $E_z=0$ por lo que no aparece en la ec. (2.1) donde E sólo depende de E_x y E_y ; es decir, se tiene una onda plana y transversal propagándose en el eje z . Las diferentes combinaciones de las amplitudes de E_x y E_y y sus respectivas fases generan varias formas geométricas (lineales, circulares y elípticas) del EDP. Para identificar qué EDP tiene la luz se deben conocer los parámetros siguientes:

1. El azimut (α), es el ángulo entre el eje de mayor intensidad del EDP y el eje x determinado, α puede variar entre -90° y 90° ó entre 0° y 180°
2. La elipticidad ($e=\tan|\omega|=b/a$, ver fig. 2.2) que se define como la razón del semieje menor b con el semieje mayor a de la elipse, el valor de e está entre 0 y 1.
3. El sentido (derecho, izquierdo) dado por ω que es el ángulo relacionado con e , ω puede tomar valor de $-45^\circ \leq \omega \leq 45^\circ$, donde valores positivos de ω significan sentido derecho del EDP y valores negativos de ω implican sentidos izquierdos del EDP.

Como puede notarse e tiene sólo valores positivos porque se toma el valor absoluto de ω de lo contrario e variaría entre -1 y 1, las cantidades negativas no son consideradas ya que e puede calcularse también por I_{min}/I_{max} (intensidad mínima y máxima del EDP de la luz) las cuales son siempre positivas, por lo que su relación será obviamente positiva, éstas se obtienen utilizando un polarizador y un detector óptico (ver 2.2.1).

Las características del EDP (azimut, elipticidad y sentido) se pueden observar en la fig. 2.2, mientras que las diferentes formas (lineal, circular y elíptica) del EDP se describen en los siguientes apartados.

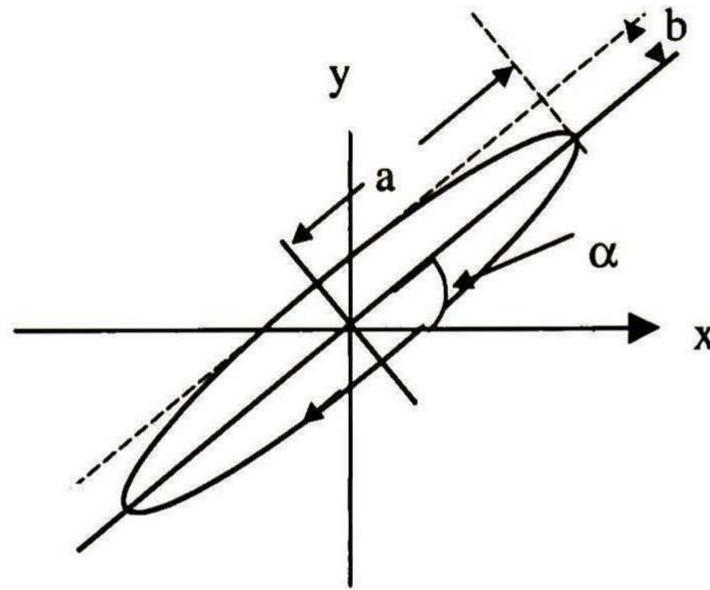


Figura 2.2. Patrón de sección transversal del EDP elíptico

2.1.1 EDP (estado de polarización) lineal

Cuando las componentes E_x y E_y tienen la misma fase se produce luz linealmente polarizada, no importando si la amplitud es igual o diferente. Para este EDP $e=0$ y α toma valor en el rango establecido anteriormente. En la figura 2.3 se pueden ver ejemplos de este EDP.

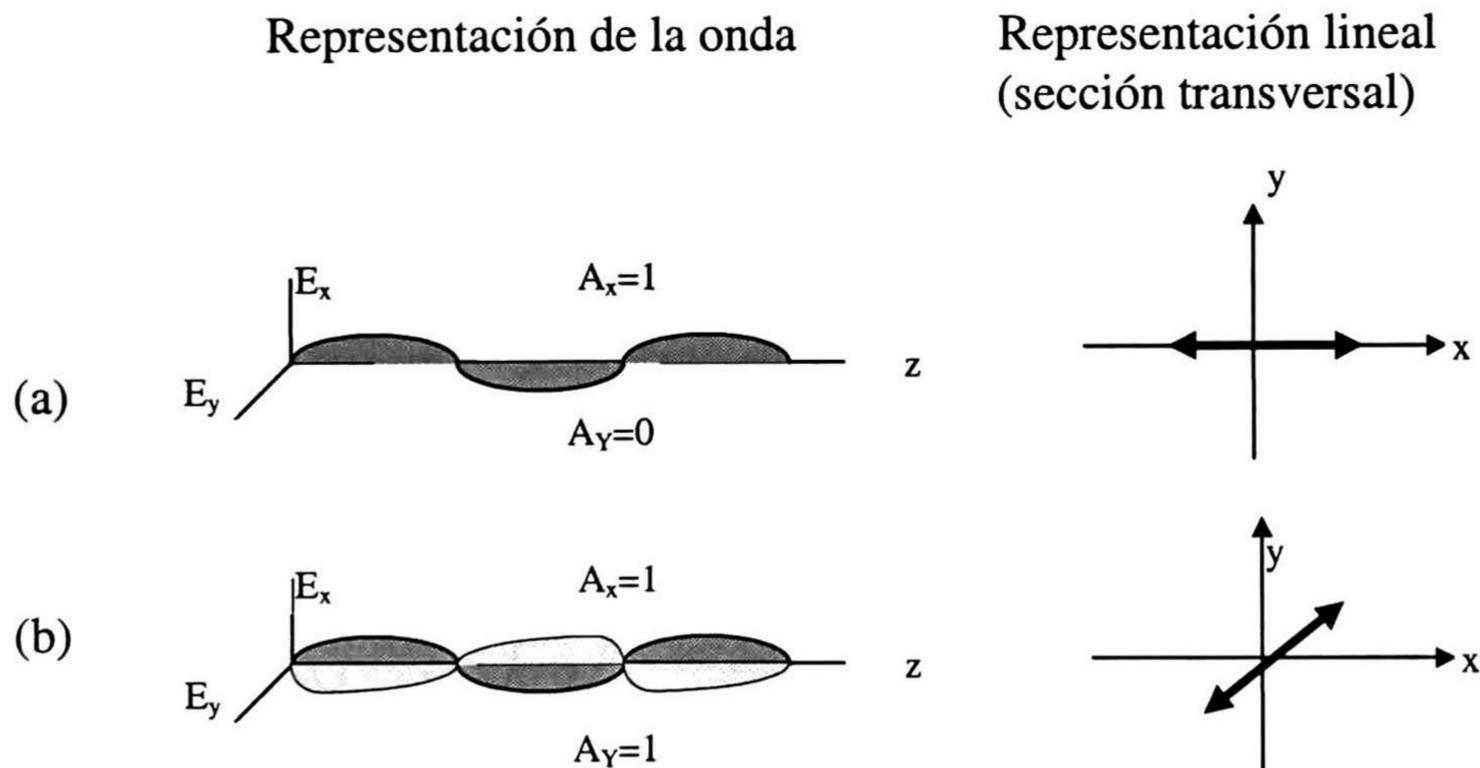


Figura 2.3. Representación gráfica de: (a) un EDP lineal a lo largo del eje x ($\alpha=0^\circ$), y (b) un EDP lineal con $\alpha=45^\circ$.

2.1.2 EDP circular

Cuando las componentes E_x y E_y del vector de campo eléctrico tienen una diferencia de fase de 90° además de igual amplitud se produce luz circularmente polarizada, por lo que $e=1$ (ver fig. 2.4 y tabla 2.1).

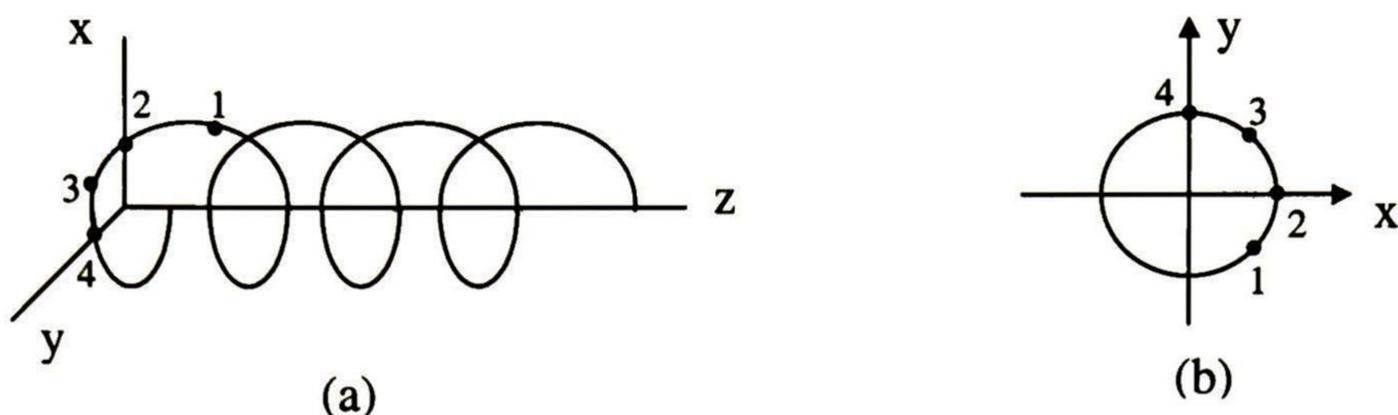


Figura 2.4. Representación de luz circularmente polarizada, izquierda, (a) trayectoria de la punta del vector de campo eléctrico en el tiempo, (b) patrón de sección transversal.

Como puede verse en la fig. 2.4 al sentido izquierdo de la luz corresponde a una trayectoria de la punta del vector de campo eléctrico cuyo giro es en la misma dirección que las manecillas de un reloj visto desde el eje z positivo. En el sentido derecho el giro es contrario al de las manecillas del reloj.

2.1.3 EDP elíptico

Si las componentes E_x y E_y son combinadas de manera diferente a las dos formas anteriormente descritas entonces se produce luz elípticamente polarizada (ver fig. 2.5 y tabla 2.1). Como puede notarse tanto el EDP lineal como el circular son casos particulares del EDP elíptico.

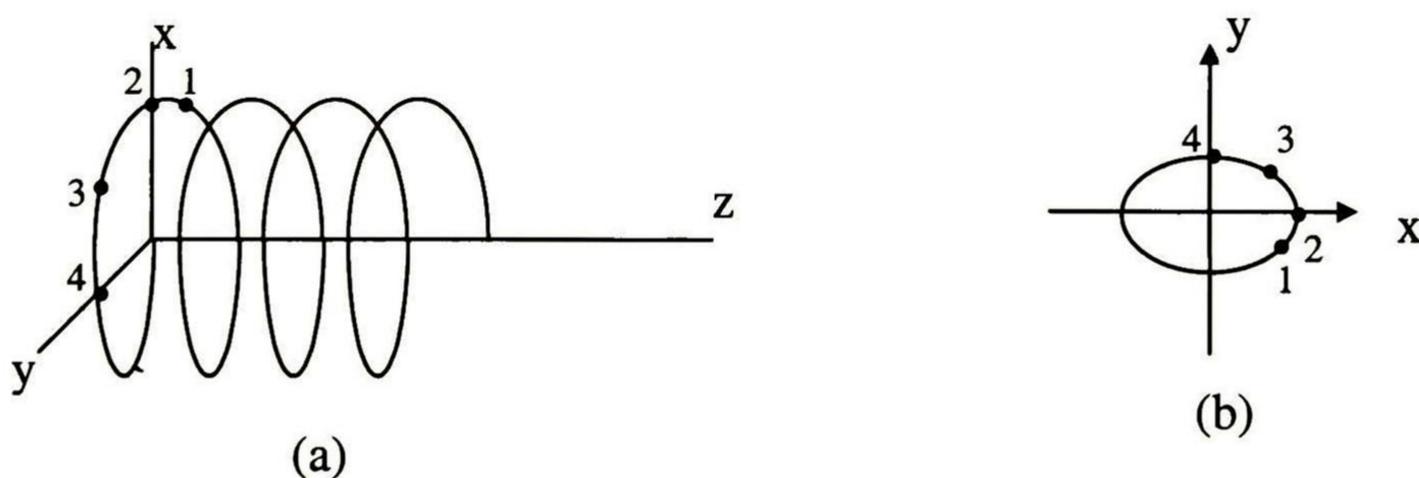
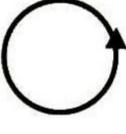
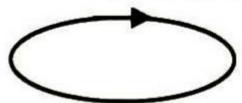
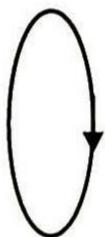
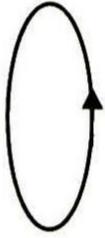


Figura 2.5. Representación de luz elípticamente polarizada, izquierda, (a) trayectoria de la punta del vector de campo eléctrico en el tiempo, (b) patrón de sección transversal.

Los sentidos derechos e izquierdos se definen de igual manera que para los EDP circulares.

Tabla 2.1

EDP	Patrón de sección transversal	Elipticidad e	Azimut (α) (grados)
Lineal horizontal		0	0
Lineal vertical		0	90
Lineal, +		0	(0,90]
Lineal,-		0	[-90,0)
Circular derecho		1	-----
Circular izquierdo		1	-----
Elíptico horizontal derecho		(0,1)	0
Elíptico horizontal izquierdo		* (-1,0)	0
Elíptico vertical derecho		(0,1)	90
Elíptico vertical izquierdo		* (-1,0)	90

* Recordar que e está definida como el valor absoluto de esta columna, pero se incluye el signo para indicar el sentido.

2.2 Dispositivos ópticos

En esta sección se describen dos elementos ópticos homogéneos [7] lineales y no depolarizadores de gran importancia: el polarizador y el retardador.

2.2.1 Polarizador lineal

El polarizador (de aquí en adelante la palabra polarizador se refiere a uno de tipo lineal) es un elemento que varía sólo las amplitudes de las componentes del vector de campo eléctrico. Este dispositivo tiene dos vectores propios ortogonales [8] que se definen como los estados de polarización (del haz incidente) que no se alteran al insertar el polarizador en la trayectoria del haz y que son conocidos como polarizaciones propias. Estos vectores son: (1) el vector propio asociado a la mayor transmitancia llamado vector característico mayor, y (2) el correspondiente a la transmitancia menor, conocido como vector característico menor. Para un polarizador ideal la transmitancia menor es cero por lo que toda la luz en la dirección del vector propio menor es bloqueada, dicho esto se puede notar que este dispositivo deja pasar luz cuyo vector de campo eléctrico no oscile en la dirección mencionada.

Debe hacerse notar que estos vectores se determinan por la orientación del polarizador; por ejemplo, para un polarizador colocado con su eje de transmisión horizontal ($\alpha=0^\circ$) y su eje de absorción vertical (ambos con respecto a un eje x establecido), los vectores propios son: 1) EDP con $e=0$ y $\alpha=0^\circ$ que correspondería al vector característico mayor y 2) EDP con $e=0$ y $\alpha=90^\circ$ que se refiere al vector característico menor del polarizador. Entonces al girar el polarizador a otro ángulo se tendrán dos nuevos vectores propios ortogonales los cuales son siempre particulares a una cierta orientación.

Entre los usos de este elemento están cuando se usa para polarizar luz dando a ésta un EDP específico, o cuando se emplea para girar un EDP, o como parte de arreglos en las mediciones para la caracterización del EDP de la luz.

2.2.2 Retardador lineal

Los **retardadores** (de aquí en adelante se usa la palabra retardador para indicar uno de tipo lineal) o placas de onda (también llamados en ocasiones defasadores) son convertidores de EDP debido a que su principio de operación es dividir un haz polarizado incidente en sus dos componentes, cambiar la fase de uno en relación con el otro, y enseguida los combina nuevamente sin alterar la amplitud ya que su transmitancia es constante e independiente del EDP. Como la fase cambia, el haz

que emerge de este dispositivo tiene un EDP distinto. Los retardadores tienen también dos vectores característicos [8], que corresponden a dos EDP que pasan a través de él sin modificarse; uno de ellos asociado con el rayo más rápido dentro del elemento, es decir, el vector característico rápido (el rayo viaja más veloz en una dirección que en otra debido a que el retardador posee también dos índices de refracción). Estos vectores son constantes, no del retardador en general, pero sí de una orientación dada del mismo. Una pieza de este tipo tiene además dos clases de ángulos, uno llamado ρ que indica la posición del eje rápido con respecto a un eje x establecido, y el otro designado por la letra δ que señala la retardancia (las dos componentes de la luz E_x y E_y se retardan al viajar por el dispositivo pero lo importante es el retardo relativo entre componentes, a esta diferencia se le conoce como retardancia).

Un uso del retardador es producir algún EDP poco común; por ejemplo, para producir luz circularmente polarizada se emplea un retardador de $\lambda/4$ ($\delta=90^\circ$) con su eje rápido a 45° del α del EDP lineal que incide en él. El uso opuesto es también importante y es el que se considera en este trabajo: dado un EDP poco común utilizar un retardador para generar un EDP lineal. Tanto estos elementos como los polarizadores son empleados en polarímetros para caracterizar el EDP.

2.3 Fibras ópticas

La fibra óptica es un medio más de transmisión. Estas pueden clasificarse de acuerdo a su perfil de índice de refracción (graduado, de escalón, etc.) o con respecto a la dimensión de su núcleo (monomodo o multimodo). En este trabajo se consideran sólo las fibras monomodo debido a que en las fibras multimodales comunes no es posible recuperar el EDP.

La estructura general de las fibras ópticas es la que muestra en la fig. 2.6, la fibra puede tener muchas más capas que las que se muestran en esta figura esto para protegerla contra efectos externos como la humedad, la tensión, los roedores, etcétera.

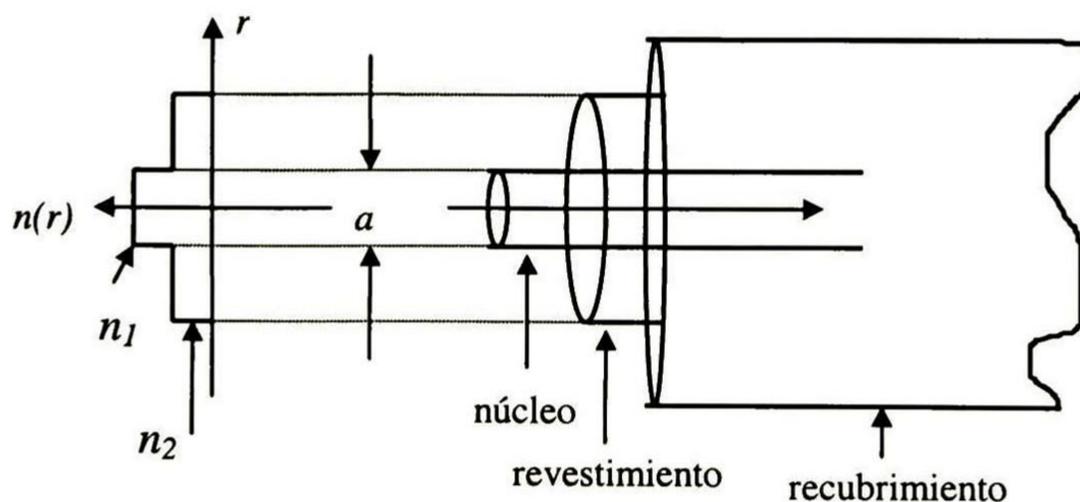


Figura 2.6. Estructura física de una fibra óptica

Las dos capas internas (núcleo-revestimiento) son de gran importancia ya que hacen posible la propagación de la luz en ese medio confinado, para lograrlo éstas deben fabricarse con la condición de que el índice de refracción (2.2) del núcleo ($n(r)$ para $r < a$, donde a es el diámetro del núcleo) debe ser mayor que el del revestimiento ($n(r)$ para $r > a$), esto es $n_1 > n_2$ (de acuerdo con la fig. 2.6) ya que como puede verse en la fig. 2.7 cuando el rayo de luz cumple con: 1) ir de un medio más denso (mayor índice de refracción) a uno menos denso y 2) incidir a un ángulo mayor al ángulo crítico (ϕ_c) y menor al ángulo máximo (α_m) ocurre la reflexión total interna, en donde toda la intensidad es reflejada al medio más denso (el núcleo en este caso). De la Ley de refracción de *Snell* (2.3) se obtienen el ángulo crítico y el ángulo máximo [9]:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = \frac{c}{v} = \frac{\text{velocidad - en - el - vacio}}{\text{velocidad - en - el - medio}} \quad (2.2)$$

Donde μ_r es la permeabilidad magnética del material y,
 ϵ_r es la permitividad eléctrica del material

$$n_1 \text{ sen } \phi = n_2 \text{ sen } \phi' \quad (2.3)$$

para $0 < \phi < \phi_c$ y $0 < \phi' < \frac{\pi}{2}$

donde ϕ_c es el ángulo al cual $\phi' = \pi/2$ ($\phi = \phi_c$) por lo que de (2.3) se tiene que:

$$\phi_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.4)$$

el ángulo máximo, α_m , está dado por la siguiente expresión:

$$\alpha_m = \text{sen}^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_a} \quad (2.5)$$

donde n_a es el índice de refracción del medio en que viaja la luz (generalmente el aire por lo que $n_a = 1$) antes de incidir en el núcleo de la fibra. De este dato α_m se desprende otro conocido como la apertura numérica (NA) que se obtiene de:

$$NA = n_a \text{ sen } \alpha_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(2n\Delta n)} \quad (2.6)$$

donde:

$$\Delta n = (n_1 - n_2) \text{ y } n = \frac{1}{2}(n_1 + n_2)$$

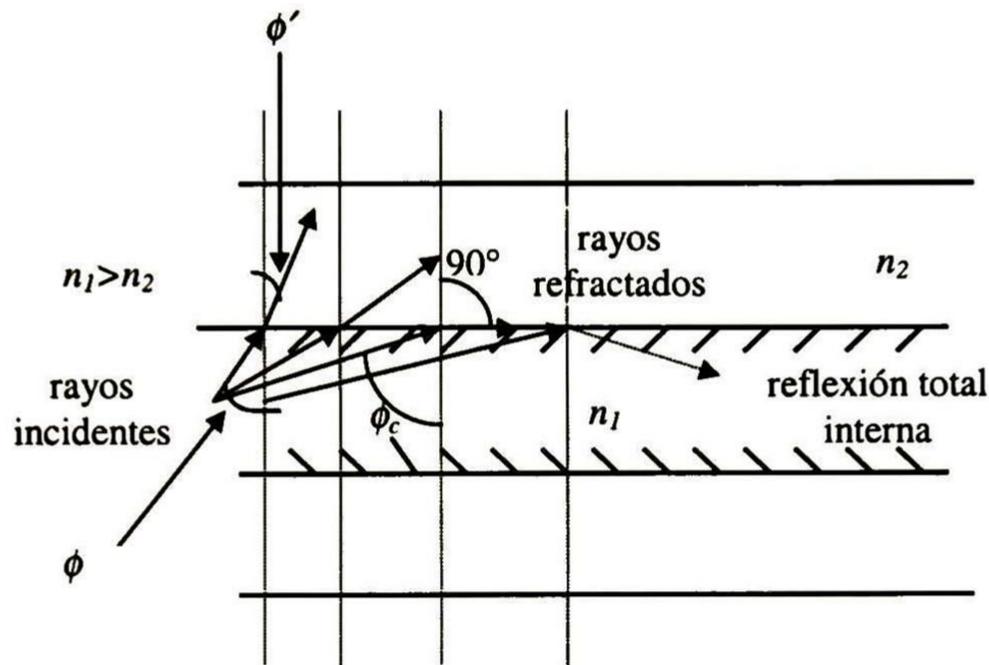


Figura 2.7. Refracción y reflexión en dos medios de diferente índice de refracción

El parámetro NA es útil para calcular la longitud de onda de corte (λ_{co}) que puede calcularse de (2.7) y que indica la λ mínima a la que la fibra monomodo se sigue comportando como tal.

$$\lambda_{co} = \frac{2\pi a \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{2.405} \quad \text{mts.} \quad (2.7)$$

La cantidad 2.405 es el valor máximo de la frecuencia normalizada V [9] para la cual sólo un modo electromagnético (HE_{11} , V mínima 0) se propaga, V se calcula con:

$$V = \frac{2a\pi}{\lambda} NA \quad \text{adim.} \quad (2.8)$$

Ahora bien, la cantidad de modos de propagación de una fibra se obtiene de:

$$Q \equiv \frac{2V}{\pi} \quad \text{adim.} \quad (2.9)$$

Cabe recordar que algunas de estas fórmulas son para todo tipo de fibra, mientras que otras como la ec. (2.9) son sólo para fibras monomodo de índice escalonado que

es la que se utilizó en la elaboración de este trabajo. Para mayor información sobre los parámetros de las fibras consultar [9,10].

2.3.1 Polarización en fibras ópticas monomodo

La teoría de propagación de una fibra monomodo establece que una fibra circularmente simétrica posee un modo fundamental HE_{11} que corresponde al modo linealmente polarizado LP_{01} , cuyo patrón de radiación se muestra en la fig. 2.8, el cual es posible en el rango $0 \leq V < 2.405$; pero existen de hecho dos estados de polarización ortogonales en este rango en donde el término monomodo se aplica a la propagación de la luz con un EDP particular.



Figura 2.8 Perfil de intensidad para el modo LP_{01} correspondiente (patrón de radiación).

En la situación real, en las fibras no se propaga perfectamente un EDP lineal (LP), de hecho éste se pierde en una corta distancia debido a irregularidades en la geometría de la fibra, al material de construcción de la misma, a cambios de temperatura, etc. por lo tanto en la salida de la misma se tiene un EDP diferente, generalmente elíptico. Sin embargo, las fibras monomodo preservan el grado de polarización (P) [11], como su nombre sugiere P indica la fracción de la intensidad total de luz que posee una forma de polarización definida. Esta propiedad ha permitido el desarrollo de diferentes técnicas para contrarrestar la modificación que presentan los estados de polarización en la propagación a lo largo de este medio (ver fig. 2.9).

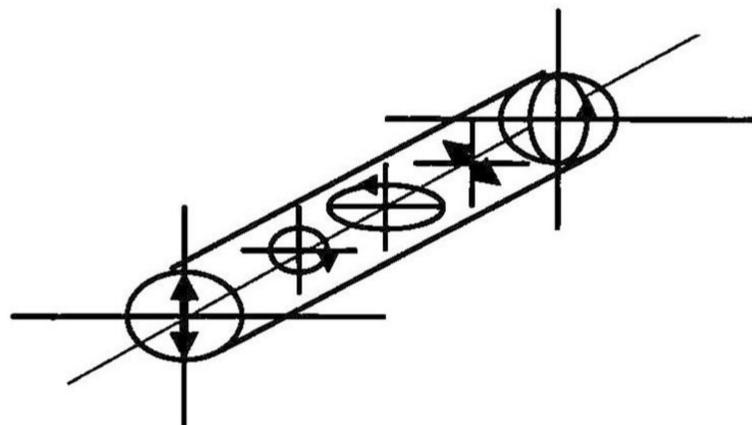


Figura 2.9 Evolución del EDP en una fibra monomodo convencional.

Debido a esto último para el CP se consideran los estados de polarización resultantes a la salida de una fibra para transformarlos (en un gran porcentaje) a los iniciales y no la evolución y representación de estos EDP en ella. No obstante, siguiendo el método de control de polarización que se revisa a continuación se puede recobrar el EDP de la luz en cualquier tipo y longitud de fibra [2,12].

2.3.2 Modulación por polarización

En los esquemas de detección coherente la señal recibida se mezcla con la del oscilador local, donde para generar el mayor pulso de señal las ondas electromagnéticas mezcladas deben tener EDP iguales. Este tipo de detección corresponde a la cuarta generación de sistemas de comunicación ópticos, generación con la que surgen dos esquemas de modulación, éstos son: PolSK (*Polarization Shift Keying*) [10, 13] y DPolSK[10, 13] (*Differential Polarization Shift Keying*) en los cuales se aprovecha no sólo la intensidad sino también la naturaleza vectorial del campo óptico.

2.4 Descripción de sistemas para control del EDP

El problema que presentan las fibras monomodo con respecto al EDP de la luz que se acopla a ellas puede resolverse usando las siguientes técnicas de compensación:

1. Controladores de polarización (CP).
2. Fibras que mantienen la polarización por ser fabricadas especialmente con un alto grado de birrefringencia (PMF *polarization maintaining fibers*).
3. Diversidad de polarización (*polarization diversity*).

El método 3 es útil cuando se emplea una circuitería óptica especial[13]. Aún cuando el segundo método suprime el efecto de variaciones en la polarización su utilización en enlaces de comunicación a grandes distancias presenta el problema de que la atenuación que tienen las PMF es mayor con respecto a las fibras convencionales (0.5-1dB/Km contra 0.2dB/Km en la tercera ventana); esto porque en el complejo proceso de fabricación la longitud más grande de una fibra PMF es de 100m, contra 2 Km aproximadamente de una fibra normal. Esto último trae como consecuencia que el número de empalmes de fibra en un enlace sea muy grande y por lo tanto la atenuación total sea mucho mayor y dependa grandemente de la perfección de los empalmes de todos los trozos que se requieran para la conexión; además esta fibra especial así como las operaciones de instalación y mantenimiento de la misma son más costosas que para las fibras monomodo convencionales.

Entre los sistemas del primer tipo se encuentran [13]: discos giratorios [2], rotadores de Faraday, cristales líquidos, *squeezers*, entre otros. En este trabajo se utilizaron discos giratorios que se elaboran al enrollar la fibra en torno a un núcleo lo cual induce birrefringencia en la fibra y se construyen así retardadores de cuarto ($\lambda/4$, $\delta=90^\circ$), de medio ($\lambda/2$, $\delta=180^\circ$), de octavo de longitud de onda ($\lambda/8$, $\delta=45^\circ$) con los que se puede transformar un EDP elíptico cualquiera en uno lineal y viceversa, esto permite convertir el EDP elíptico que se presenta en el extremo de salida de la fibra en el que era inicialmente (lineal, en este caso). El radio $R(m,N)$ con el que se debe enrollar la fibra se obtiene de la expresión [2]:

$$R(m,N) = \frac{2\pi a r^2}{\lambda} N m \quad \text{mts.} \quad (2.10)$$

donde:

N = número de vueltas (adim.)

$a=0.133$

r = radio de la fibra (mts.)

$m= 2,4,8$; para un medio, cuarto y octavo de λ respectivamente

λ = longitud de onda (mts.)

Como puede notarse ρ (ángulo del eje rápido o azimut del retardador con respecto a un eje x específico) no está determinado al construir algún elemento usando (2.10) ya que este ángulo puede variar de -90° a 90° de acuerdo con la inclinación a la que se coloquen los discos con relación al eje x que se establezca, el cálculo de este ángulo está ligado al EDP que se desee convertir a la forma inicial. Se emplea este método basado en discos giratorios porque es muy barato y el radio R que se obtuvo para la fibra utilizada no provoca daños mecánicos, siendo éste además el CP más comúnmente usado [14]. El radio crítico (mínimo) R_{CS} para doblar una fibra óptica monomodo, sin provocar daños o quebraduras en ella, está dado por la siguiente ecuación [15]:

$$R_{CS} \cong \frac{20\lambda}{(n_1 - n_2)^2} \left(2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad \text{mts.} \quad (2.11)$$

Donde:

λ es la longitud de onda (mts.)

λ_c es la longitud de onda de corte (mts.)

n_1 y n_2 son los índices de refracción de núcleo y revestimiento de la fibra respectivamente.

El CP que se usó en el sistema está constituido por dos retardadores de $\lambda/4$ y uno de $\lambda/2$ contruidos al enrollar la fibra óptica de acuerdo con (2.10). Dicho CP está ubicado como se muestra en la fig. 2.10. El radio R en (2.10) para $\lambda=632.8\text{nm}$ y $r=125\mu\text{m}$ de la fibra que se utilizó fue de 2.06cm con una vuelta para hacer los retardadores de $\lambda/4$, y con dos vueltas para el de $\lambda/2$, la magnitud de este radio puede estar entre 1.997cm y 2.12cm esto debido a la tolerancia de $\pm 2\mu\text{m}$ que proporciona el fabricante de la fibra en cuanto al radio de la misma. La medida de R permite no tener quebraduras en la fibra ya que de acuerdo con (2.11) y siendo $n_1=1.4616$ y $n_2=1.4571$ en la fibra que se empleó se calcula que R_{cs} es 9.1434^{-3} . Sin embargo de acuerdo con el fabricante la fibra puede estar enrollada con un diámetro de 10mm por alrededor de una hora o con 20mm por años sin presentar deterioro, este dato hace posible que el CP cuyos elementos tienen un radio de 20.6mm pueda estar implementado por años sin causar daños.

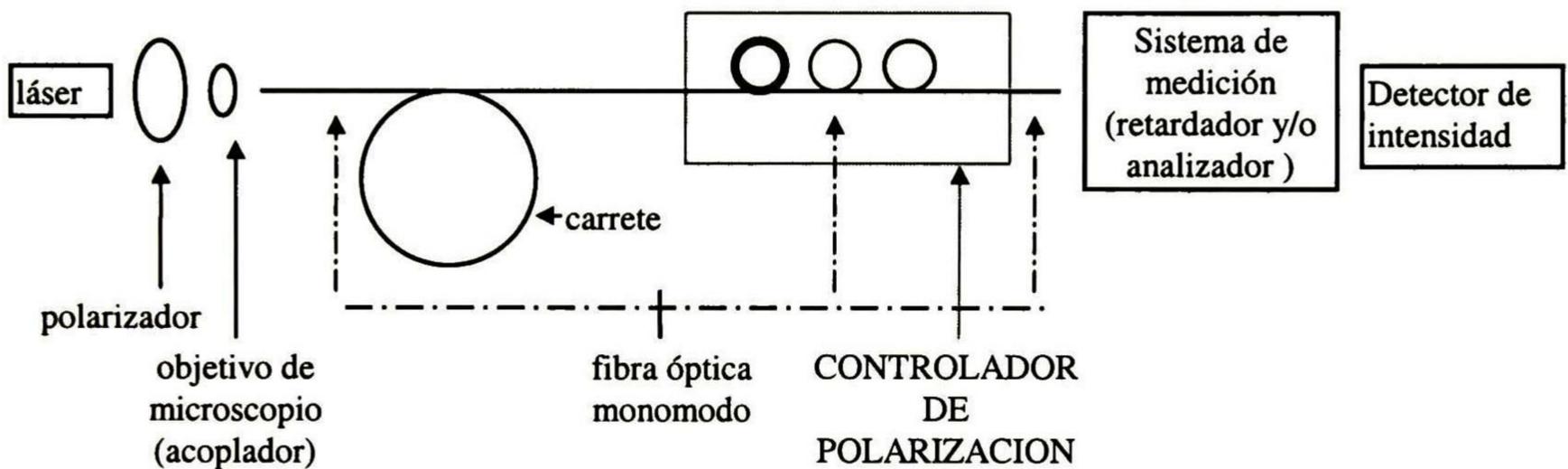


Figura 2.10 Diagrama general del sistema

Es importante resaltar que los retardadores que conforman el CP pueden ser también lentes externas a la fibra pero estos dispositivos presentan los problemas de que son muy costosos, grandes, frágiles, además de que no transmiten toda la luz que incide en ellos, por ejemplo, si cada lente permitiera el paso de un 90% de la luz después de tres retardadores se tendría el 72.9% de la intensidad que había antes del CP (implementado con lentes externos a la fibra). En cuanto al costo se tiene, por ejemplo, que el precio de un retardador de $\lambda/4$ para luz con longitud de onda 632.8nm es de 583 dólares. Cualquiera de los dos métodos para recuperar el EDP ya sea con retardadores externos, o con estos mismos dispositivos pero elaborados con la fibra de acuerdo con (2.10) funcionan.

Capítulo 3

Herramientas para el análisis del EDP y elementos del sistema

En este capítulo se describe la representación matemática del EDP, el polarizador y el retardador, así como una herramienta gráfica para conocer el efecto que este último produce en el EDP, de igual manera se detallan algunos procedimientos para obtener el vector de *Stokes* del EDP. Todo con el objetivo de introducir conceptos y desarrollos que fueron utilizados para obtener resultados en el sistema y que son citados en capítulos posteriores.

3.1 Vector de *Stokes*

Para describir un EDP se puede recurrir al vector de *Stokes* que posee cuatro componentes de valor real que se obtienen por mediciones, este vector sirve para representar luz total o parcialmente polarizada. El vector de *Stokes* que representa al EDP general está dado por [5]:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{-45} \\ I_{rcp} - I_{lcp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x^2 + A_y^2 \\ A_x^2 - A_y^2 \\ 2A_x A_y \cos \Delta \\ 2A_x A_y \sin \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\omega)\cos(2\alpha) \\ \cos(2\omega)\sin(2\alpha) \\ \sin(2\omega) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

(a) (b) (c)

Donde:

- $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}$ (watts): intensidad de luz cuyo EDP es lineal con: $\alpha=0^\circ, \alpha=90^\circ, \alpha=45^\circ, \alpha=-45^\circ$ respectivamente
- I_{rcp}, I_{lcp} (watts): intensidad de luz con: EDP circular derecho y EDP circular izquierdo
- $\Delta = \phi_y - \phi_x$ (fase de la componente en y menos la fase de la componente en x)
- A_x^2 es la intensidad de la componente en x
- A_y^2 es la intensidad de la componente en y
- $\alpha =$ azimut
- $e = \tan|\omega|$ (elipticidad)

Los parámetros Q , U y V están asociados a las diferencias de intensidades de los componentes x y y , de los componentes a 45° y -45° y de los componentes circulares derecho e izquierdo respectivamente, mientras que I es la intensidad total que se toma igual a 1 y se normaliza con respecto a esta intensidad a los otros tres componentes del vector. Una vez conocidos I , Q , U , y V se pueden obtener e y α de acuerdo con:

$$e = \tan|\omega| = \tan\left(2^{-1} \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{V}{I}\right)\right) \quad (3.2)$$

$$\alpha = 2^{-1} \tan^{-1}\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (3.3)$$

También se puede conocer a partir de este vector el grado de polarización (P) mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad \% \quad (3.4)$$

Donde $I=1$ para vectores normalizados. El grado de polarización lineal (P_l) y circular (P_c) se pueden calcular a partir de:

$$P_l = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad \% \quad (3.5)$$

$$P_c = \frac{V}{I} \quad \% \quad (3.6)$$

Se tiene además y se puede ver en la ec. 3.4 que para luz totalmente polarizada $1=Q^2+U^2+V^2$ mientras que para luz parcialmente polarizada $0<Q^2+U^2+V^2<1$.

3.2 Matrices de *Mueller*

Con las matrices de *Mueller* se puede conocer el EDP que resulta en la luz después de interactuar con algún dispositivo óptico representado por una matriz específica,

así pues los elementos ópticos mencionados en el capítulo anterior tienen una matriz particular [5], misma que para un polarizador o analizador lineal es la siguiente.

$$M_p = \tau_0 \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

donde: $\theta =$ azimut

Y τ_0 es el coeficiente de transmisión para luz no polarizada, éste se obtiene de:

$$\tau_0 = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad \text{adim} \quad (3.8)$$

Donde τ_{min} y τ_{max} son los coeficientes de transmisión del polarizador con respecto a su vector característico menor y mayor respectivamente. Estos dos se calculan con las ecs. 3.9 y 3.10 y se pueden medir con el arreglo de la fig. 3.1 para el polarizador que se vaya a usar:

$$\tau_{min} = \frac{I_{90}}{I_T} \quad \text{adim} \quad (3.9)$$

$$\tau_{max} = \frac{I_0}{I_T} \quad \text{adim} \quad (3.10)$$

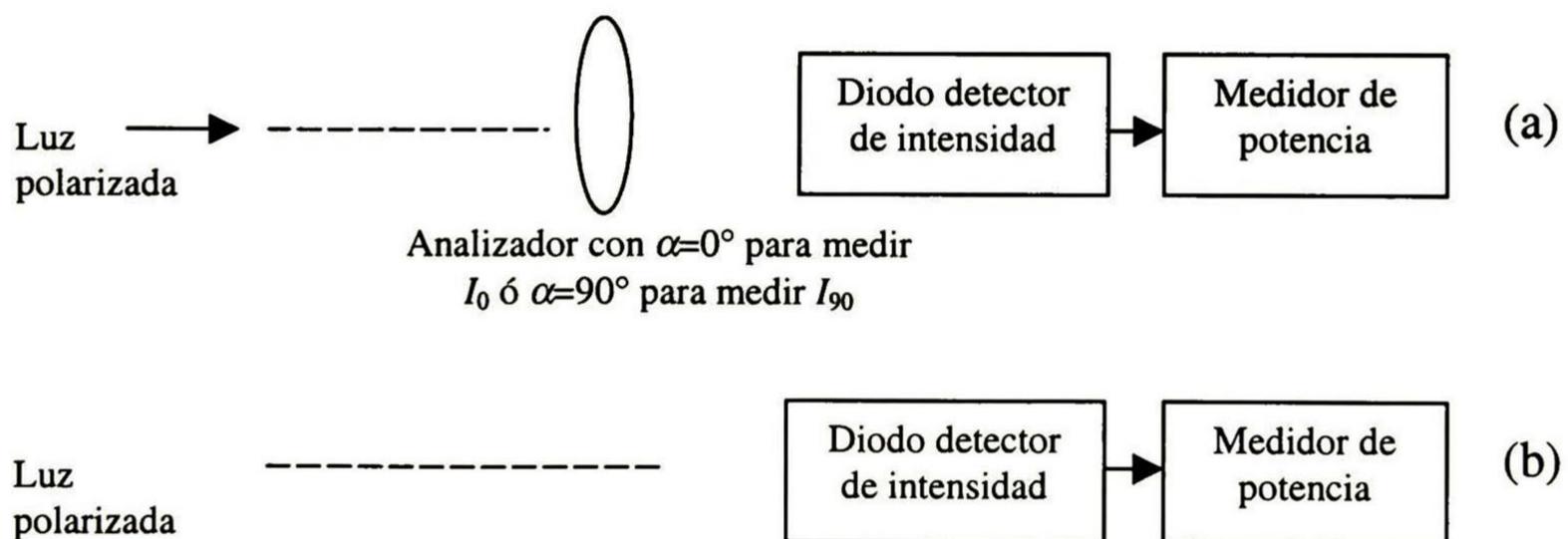


Figura 3.1 Arreglo para medir los coeficientes de transmisión mínimo y máximo de un polarizador. En (b) se mide la intensidad total (I_T), en (a) I_0 e I_{90} .

Para un polarizador “ideal” $\tau_{min}=0$ y $\tau_{max}=1$ razón por lo cual en [5] $\tau_0=1/2$.

La matriz de *Mueller* para un retardador lineal es:

$$M_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_4 \operatorname{sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & S_4 \operatorname{sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & -S_2 \operatorname{sen}(\delta) \\ 0 & S_4 \operatorname{sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & -C_4 \operatorname{sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & S_2 \operatorname{sen}(\delta) \\ 0 & S_2 \operatorname{sen}(\delta) & -C_2 \operatorname{sen}(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Donde:

ρ =azimut, δ =retardancia

$$C_2 = \cos(2\rho) \quad C_4 = \cos(4\rho) \quad S_2 = \operatorname{sen}(2\rho) \quad S_4 = \operatorname{sen}(4\rho)$$

El retardador posee también coeficientes de transmisión (τ_l y τ_r) [3], que para un elemento “ideal” tienen valor de 1, cantidad que se adoptó en este trabajo por lo cual no forman parte de la matriz (3.11).

Se mencionó en el capítulo anterior que el polarizador no desfasa y que un retardador no modifica la amplitud de la luz, pero estas son características de elementos perfectos o ideales ya que ambos dispositivos pueden producir los dos efectos mencionados. Esto da lugar a que la matriz de cualquiera de estos elementos pueda descomponerse en un arreglo de dos o tres matrices [7] que consideran los dos fenómenos mencionados, además de un factor de depolarización (cuando se consideran como elementos depolarizantes) en su análisis.

Finalmente, es importante agregar que tanto la matriz de un retardador como la de un polarizador se pueden obtener también mediante mediciones [5]; sin embargo, se utilizan aquí las matrices de los elementos ideales debido a que se requiere de mucha precisión en los arreglos para realizar las 16 mediciones necesarias para determinar cada matriz; además de que no era éste el propósito del presente trabajo.

3.3 Esfera de *Poincaré*

La esfera de *Poincaré* (de radio 1) es una herramienta gráfica en la que se representan todos los estados de polarización, a cada uno le corresponde un punto particular, se utiliza también para observar el efecto que sufre un EDP por uno o

varios retardadores. Los puntos fáciles de encontrar son los que pertenecen a los siguientes estados de polarización (ver fig. 3.2):

- EDP lineal (H) con $\alpha=0^\circ$.
- EDP lineal (V) con $\alpha=90^\circ$
- EDP circular (lcp , *left circular polarization*) izquierdo.
- EDP circular (rcp , *right circular polarization*) derecho.

Para localizar cualquier otro EDP se encuentran sus coordenadas en la esfera las cuales están dadas (de igual manera que para el vector de *Stokes*) por:

$$\begin{aligned} x &= \cos(2\omega)\cos(2\alpha) & z &= \sin(2\omega) \\ y &= \cos(2\omega)\sin(2\alpha) \end{aligned} \quad (3.12)$$

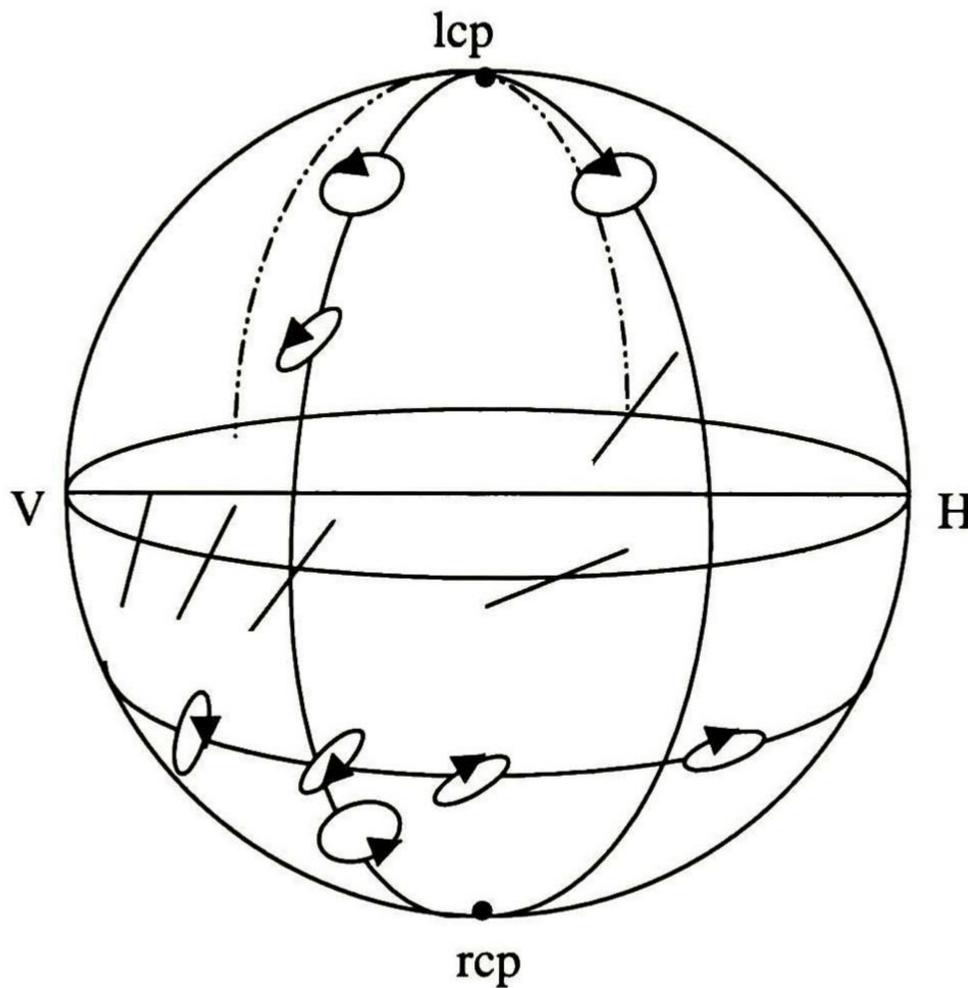


Figura 3.2 Esfera de Poincaré.

Para determinar el efecto de un retardador a un EDP se efectúan los pasos siguientes:

1. Localizar el punto P_1 correspondiente al EDP de la luz.
2. Localizar el punto R correspondiente al retardador.
3. Se traza un arco con punto inicial P_1 de longitud (en grados) dada por la δ (retardancia) del retardador en sentido de las manecillas del reloj. El punto final del arco es el nuevo EDP (P_2).

Esta esfera se utiliza en el capítulo 6, donde se describe el *software* que se manejó.

3.4 Métodos de medición

Existen varios métodos para determinar el EDP que presenta la luz, éstos son:

Método 1 [16] es el que se deriva directamente del vector (a) en la ec. 3.1. Se realizan seis mediciones que corresponden a: I_0 , I_{90} , I_{45} , I_{-45} , I_{rcp} , I_{lcp} . Las primeras cuatro mediciones se obtienen con el siguiente arreglo (fig. 3.3, girando apropiadamente el analizador para colocarlo con el azimut correcto):

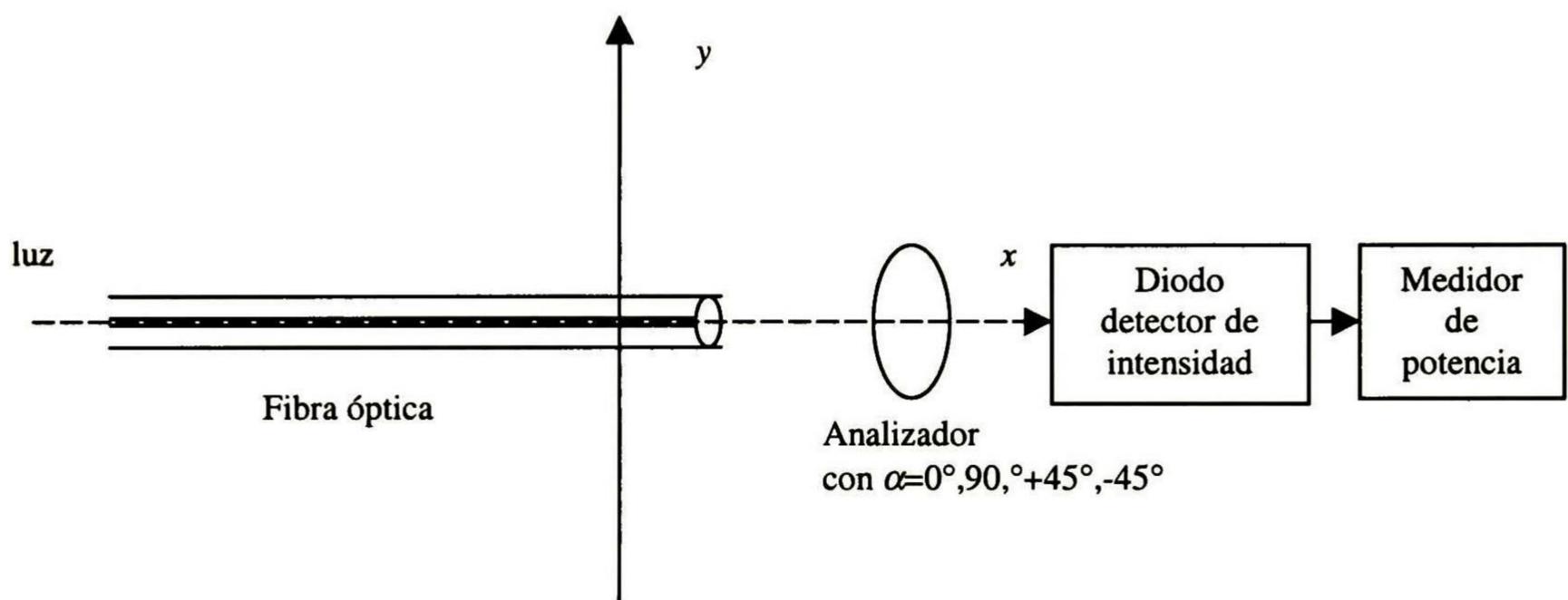


Figura 3.3 Arreglo para medir las intensidades de EDP lineales.

Las dos últimas mediciones se obtienen agregando al arreglo anterior un retardador de $\lambda/4$ como se muestra en la fig. 3.4.

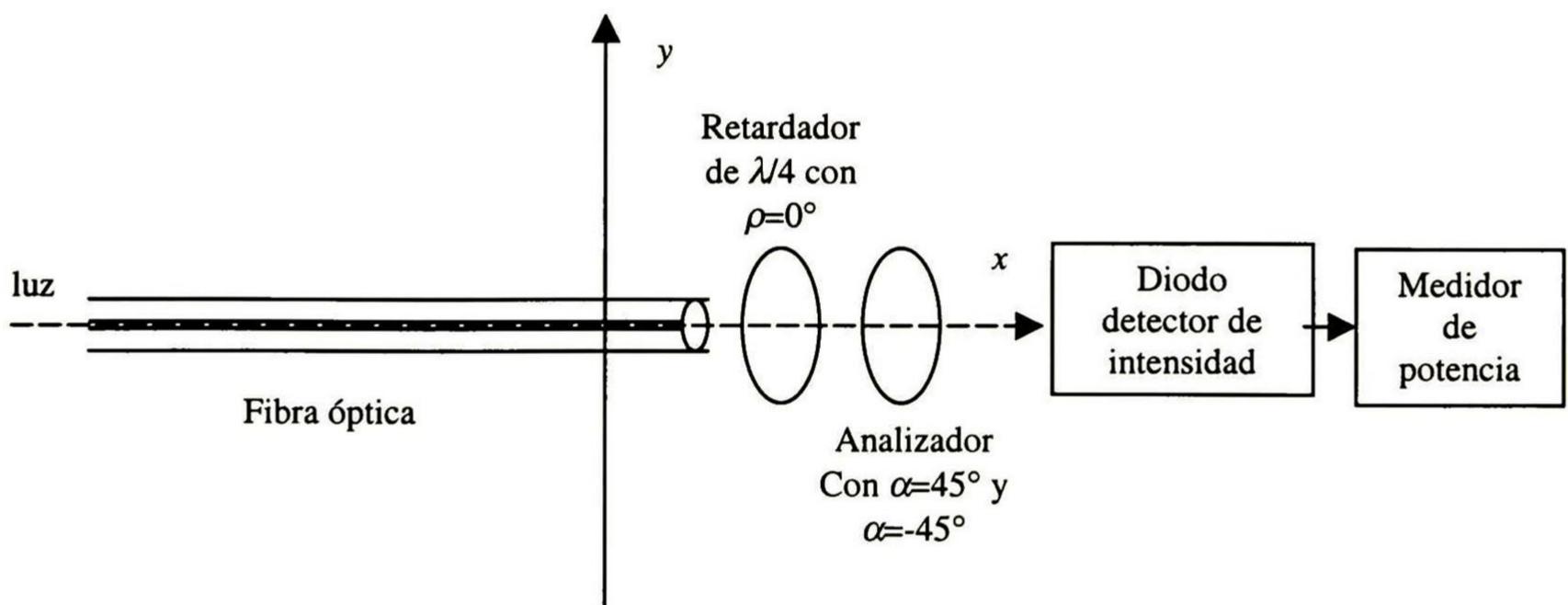


Figura 3.4 Arreglo para medir las intensidades de EDP circulares.

Con estas seis mediciones se forma el vector de *Stokes* correspondiente al EDP de la luz que se está examinando, los parámetros e , α , P , etc., se calculan según las fórmulas del apartado anterior (3.1).

Si se va a trabajar únicamente con estados de polarización lineales sólo son necesarias las primeras cuatro mediciones con las que se calculan I , Q y U , α se conoce de la ec. 3.3 y e se sabe es cero. Para determinar α se puede seguir también el método dos que se describe a continuación.

Método 2. Se deben de realizar las mediciones para I_0 , I_{90} , I_{45} , I_{-45} con el arreglo de elementos que se vio para el método 1. Con éstas se determinan I , Q , U y β , esta última de acuerdo con:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{I_{90}}}{\sqrt{I_0}}\right) \quad (3.13)$$

Esta relación entre A_y e I_{90} y A_x e I_0 se pueden ver de (a) y (b), en 3.1, en donde:

$$I_0 = A_x^2 \quad e \quad I_{90} = A_y^2 \quad (3.14)$$

Después se calcula el azimut con la ec. (3.15), tomando la siguiente consideración: sí $I_{45} > I_{-45}$ entonces $\cos(\Delta)=1$, si no ($I_{45} < I_{-45}$) entonces $\cos(\Delta)=-1$. Esto debido a que un EDP lineal puede representarse como la suma de dos EDP lineales ortogonales que pueden estar en fase ($\Delta=0^\circ$) o desfasados ($\Delta=180^\circ$).

$$\alpha = 2^{-1} \tan^{-1}(\tan(2\beta)\cos(\Delta)) \quad (3.15)$$

Por tratarse de EDP que se suponen realmente lineales no es necesario calcular e , se toma como cero.

De la manipulación algebraica de lo expuesto en la ec. 3.1 se pueden derivar relaciones entre los elementos de los diferentes incisos y con ellas tener varias alternativas para formar el vector de *Stokes*. Se presentan a continuación dos de estas opciones y se finaliza este apartado con el método 5 que se deriva de la tesis mencionada [3].

Método 3. Se realizan también las cuatro primeras mediciones (I_0 , I_{90} , I_{45} , I_{-45}) de donde resultan como ya se ha mencionado I , Q y U y se calcula α de la ec. 3.3, se

igualan después los segundos renglones de los vectores en (3.1) incisos a y c con lo que se tiene:

$$I_0 - I_{90} = \cos(2\omega)\cos(2\alpha) \quad (3.16)$$

De 3.16 se despeja ω :

$$\omega = 2^{-1} \cos^{-1}\left(\frac{I_0 - I_{90}}{\cos(2\alpha)}\right) \quad (3.17)$$

Con este valor de ω se determina la componente (V) que faltaba del vector y se calcula también el valor de e usando la fórmula en (3.2).

Método 4. Se obtienen $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}$. Se toman e igualan los terceros renglones de la expresión en (3.1) vectores (a) y (b) y se despeja Δ :

$$\Delta = \cos^{-1}\left(\frac{I_{45} - I_{-45}}{2A_x A_y}\right) \quad (3.18)$$

Esta expresión se sustituye en el cuarto renglón del inciso (b) de 3.1 para calcular V , por lo que se tendría entonces al vector de *Stokes* completo. e y α se determinan de 3.2 y 3.3 respectivamente.

Método 5. Una vez conocidas las transmitancias mínima y máxima (τ_{min} y τ_{max}) que caracterizan al analizador (ver sección 3.2), se calcula la transmitancia total (τ) [17] de luz a través de un polarizador o analizador por medio de:

$$\tau = \tau_{min} + \left[\frac{1 + g^2 g_{max}^2 + 2gg_{max} \cos 2(\theta - \theta_{max})}{(1 + g^2)(1 + g_{max}^2)} \right] (\tau_{max} - \tau_{min}) \quad \text{adim.} \quad (3.19)$$

Donde:

$$g = \frac{1 + e}{1 - e} \quad (3.20)$$

$$g_{max} = \tan\left(e_{max} + \frac{1}{4}\pi\right) \quad (3.21)$$

Por ser el analizador un elemento lineal $e_{max}=0$, $g_{max}=1$, θ es el azimut que tiene la luz y θ_{max} es el azimut al que se coloca el analizador, siempre y cuando $\theta < \theta_{max}$. Como en un principio no se sabe qué azimut posee la luz no se puede asegurar que se cumplirá con la condición anterior, por lo cual se toman definiciones inversas para estos ángulos y se realiza una medición a 90° (I_{90}) que es el ángulo al que se asegura que $\theta > \theta_{max}$ y se calcula el azimut de la luz (ahora θ_{max}) con la siguiente ecuación:

$$\theta_{max} = \theta - \left(\frac{\cos^{-1} \left(2 \left(\frac{\tau - \tau_{min}}{\tau_{max} - \tau_{min}} \right) - 1 \right)}{2} \right) \quad (3.22)$$

Con 3.22 se obtiene el valor de α , pero hace falta saber si es un ángulo positivo o negativo; para ésto se efectúa otra medición I_{89} y se establece que el ángulo es negativo si la transmitancia a -89° es mayor que la transmitancia a 90° , el valor de α es positivo si ocurre lo contrario. Para obtener e se requiere de una medición circular I_k y se hace uso de la siguiente ecuación [3]:

$$e = \frac{-k_3 \pm \sqrt{k_3^2 - 4(z_3 z_4 + z_1)(z_2 - z_4 z_3)}}{2(z_3 z_4 + z_1)} \quad (3.23)$$

Con:

$$z_1 = k_1 \cos^2(\alpha - \rho) + k_2 - \tau_0^l$$

$$z_2 = k_1 \sin^2(\alpha - \rho) + k_2 - \tau_0^l$$

$$z_3 = (\tau_{max} - \tau_{min}) \cos 2(\theta_i - \alpha)$$

$$z_4 = \frac{I_k - \tau_0^l I_l}{2(I_i - \tau_0 I_l)}$$

$$k_1 = (\tau_l + \tau_r)(\tau_{max} - \tau_{min}) \sin^2(\theta_k - \rho) + \tau_l \tau_{min} - \tau_{max} \tau_r$$

$$k_2 = \tau_r \tau_{min} \sin^2(\theta_k - \rho) + \tau_r \tau_{max} \cos^2(\theta_k - \rho)$$

$$k_3 = \sqrt{\tau_l \tau_r} (\tau_{max} - \tau_{min}) \sin 2(\theta_k - \rho)$$

$$\tau_0^l = 2^{-1}(\tau_l - \tau_r)(\tau_{max} - \tau_{min}) \sin^2(\theta_k - \rho) + 2^{-1}(\tau_l \tau_{min} + \tau_r \tau_{max})$$

$$\tau(\theta, \rho) = \frac{1}{e^2 + 1} (e^2 (k_1 \cos^2(\alpha - \rho) + k_2) + ek_3 + k_1 \sin^2(\alpha - \rho) + k_2)$$

Donde:

$$I_i = I_{90} \text{ (watts)}$$

$$I_l = I_T \text{ (watts)}$$

$$\theta_k = 45^\circ$$

$$I_k = I_{rcp} \text{ (watts)}$$

ρ = azimut del retardador 0° (en la medición de I_k)

α = es el azimut de la luz calculado en la ec. 3.21.

τ_0^l es el coeficiente de transmisión del retardador y $\tau(\theta, \rho)$ es el coeficiente de transmisión del retardador y el analizador que se requieren para medir I_k . Una vez conocidos e y α se forma el vector como en (c) de (3.1). Tanto el desarrollo para obtener estas expresiones como el método en que se basa éste se pueden ver en [3]. En [18] se puede consultar otro procedimiento para formar el vector de *Stokes*.

Capítulo 4

Dispositivos físicos del sistema

En este capítulo se detallan los elementos que forman parte del sistema, con el fin de dar a conocer características como: material, dimensión, modo de operación, λ de trabajo, etc.

4.1 El objetivo de microscopio (M-20X).

El objetivo de microscopio es un sistema de lentes, mismas que en este caso particular están cubiertas de un compuesto antirreflejante (MgF_2) para luz en el espectro visible. Este dispositivo posee un 10% de atenuación, además de las características de la tabla 4.1 y se utilizó en este trabajo para acoplar la luz del láser a la fibra de acuerdo con lo descrito en [19].

Tabla 4.1

Amplificación	20x
Apertura numérica (NA)	0.40
Longitud focal (mm)	8.3
Distancia de trabajo (mm)	1.9
Apertura (mm)	7.0

Para la tabla anterior se tiene que la NA posee el mismo significado que para una fibra óptica (ver cap. 2), en tanto que la amplificación de una lente es función de la distancia o longitud focal f y del índice de refracción del material del que esté construida, siendo f la distancia entre el centro de la lente y el punto focal F (ver fig. 4.1) [20]. Desde un punto de vista práctico la distancia focal depende de la curvatura de la lente, mientras más curva sea la lente menor será f y mayor será la amplificación, para un único índice de refracción.

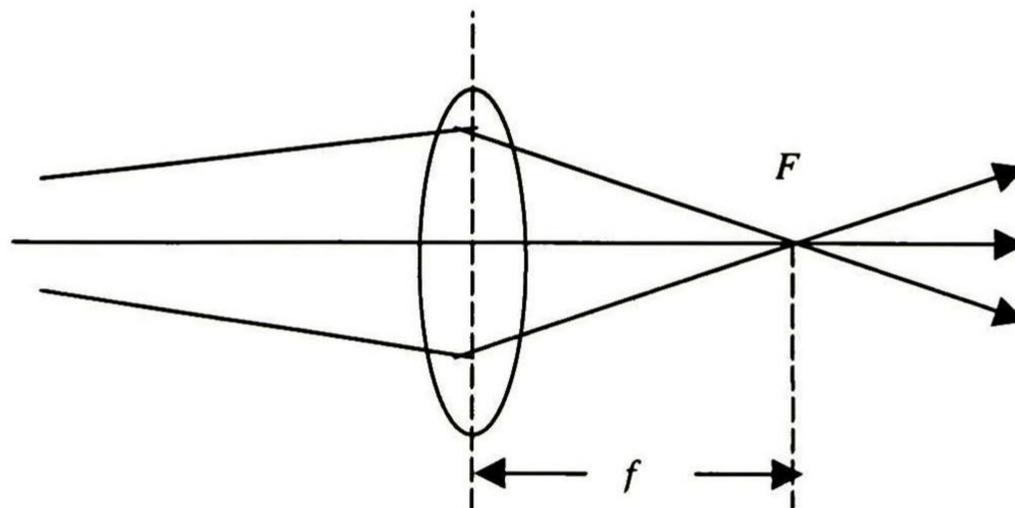


Figura 4.1 Longitud focal

De la figura anterior es fácil adivinar que si la fibra no está unida a la fuente de luz mediante un conector (con lo que habría menor pérdida) y ésta última emite un haz de luz con un diámetro mayor al del núcleo de la fibra, debe utilizarse una lente para tratar de acoplar a la fibra tanta luz como sea posible. Sin embargo, las lentes absorben parte de la intensidad de la luz por lo que su utilización trae consigo una atenuación de luz antes de su entrada a la fibra además de que la tarea se complica debido a que todos los elementos (fuente-lente-fibra) deben estar perfectamente alineados y las distancias entre ellos debieran de ser exactas, pero es difícil asegurar que cualquiera de estos elementos esté en la posición adecuada ó 7, 8.79, 10 μm o más fuera de ella. Por todo lo anterior se tiene que si la fibra es iluminada con un haz cuyo diámetro sea ligeramente (o enormemente) mayor al de la fibra la energía entra con modos de propagación superiores al de la fibra lo que produce que la energía se escape por el revestimiento. Esto puede comprobarse (como se observó en este trabajo) en el laboratorio ya que si se utiliza una fuente de luz visible los primeros centímetros de la fibra se iluminan demasiado debido a que la luz se está escapando por el fenómeno aquí descrito [21].

4.2 Polarizador dicroico (03 FPG 007).

Se utilizaron dos polarizadores, uno para asegurar el EDP de la luz a la entrada de la fibra óptica y otro como parte del arreglo para determinar el EDP de la señal en cualquier punto del sistema; ambos elementos están hechos de una hoja de plástico polarizador dicroico [5] que está colocada en medio de dos placas de cristal, montadas todas herméticamente en un anillo de aluminio negro (ver fig. 4.2). Del polarizador es necesario ubicar el eje de mayor transmisión (ver capítulo anterior), para poder colocarlo a la orientación (α) deseada. En los dispositivos que se utilizaron, este eje está indicado por unas ranuras en los extremos de la pieza.

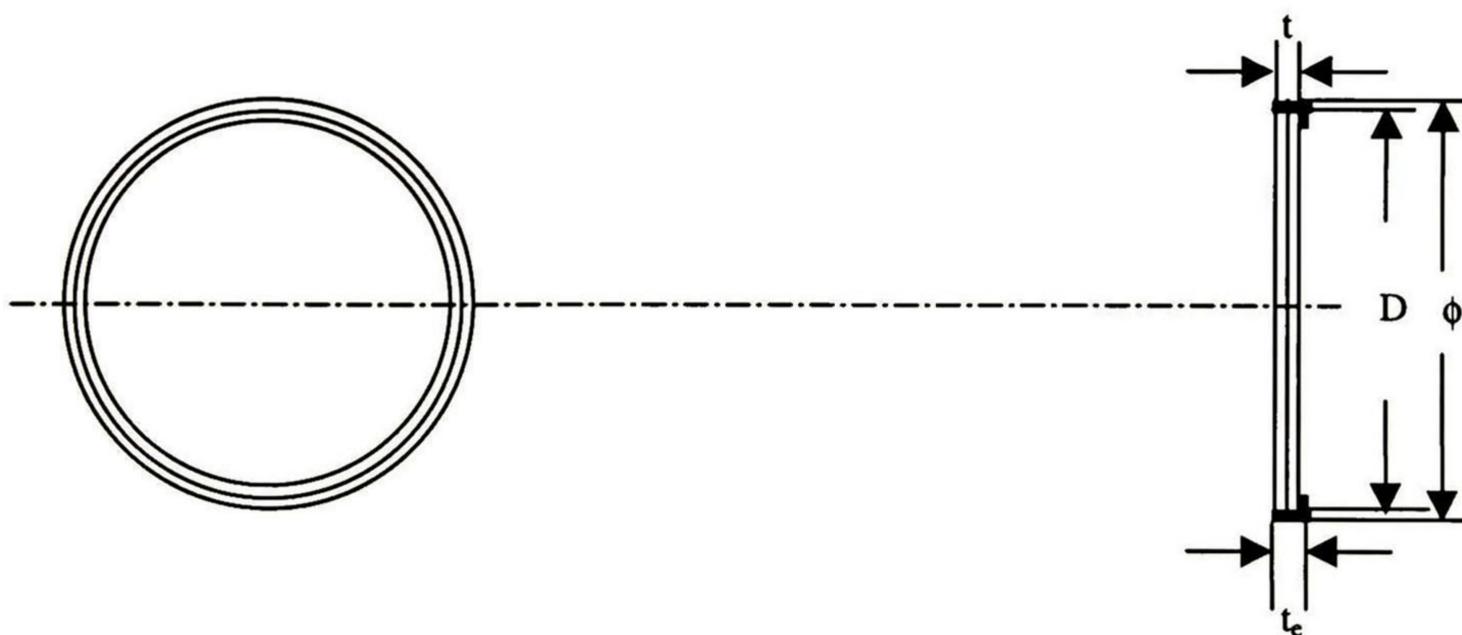


Figura 4.2 Polarizador dicroico.

De acuerdo con el fabricante este polarizador tiene, entre otras, las siguientes características (tabla 4.2).

Tabla 4.2

Diámetro, ϕ (mm)	50.8
Apertura D, (mm)	45.4
Grosor del lente, t (mm)	2.5
Grosor del anillo, t_e (mm)	5.3
Rango de λ (nm)	350-650
Coefficiente de transmisión (CT) para luz no polarizada (%)	32
Tolerancia de ϕ (mm)	± 0.25
Tolerancia de t (mm)	± 0.5

Otros datos importantes del polarizador son los coeficientes de transmisión para luz polarizada y no polarizada. Del segundo puede calcularse el primero, como puede verse en la tabla 4.2 el CT (coeficiente de transmisión, porcentaje de luz que se transmite) para luz no polarizada (específicamente para el elemento fabricado con los materiales y de la forma aquí detallada) es 0.32 y no 0.50 como correspondería a un elemento ideal. De este dato se obtiene que el CT para luz polarizada (aproximadamente) es 0.64, valor que fue verificado mediante las mediciones que se realizaron.

4.3 El retardador de $\lambda/4$ (02 WRM 019).

El retardador que se empleó es un elemento de poca atenuación (0.1 %) que está especialmente fabricado para trabajar como retardador de cuarto de onda para luz con λ igual a 632.8nm, este dispositivo está elaborado con una hoja de mica cubierta también por dos placas de cristal que la protegen y fortalecen (ver fig. 4.3).

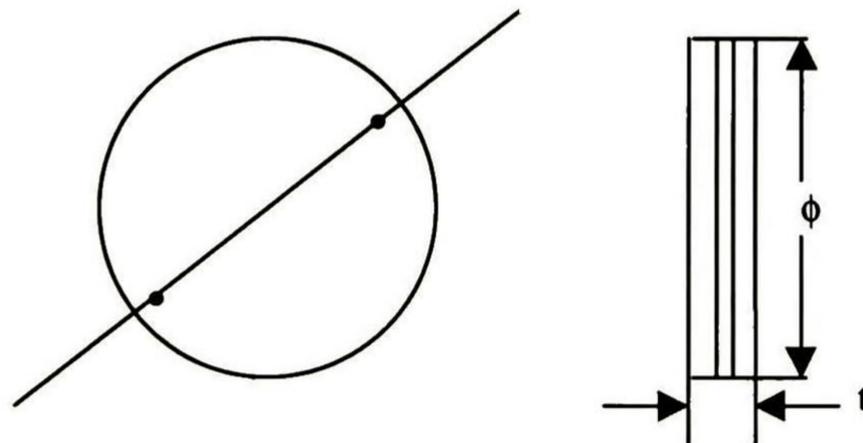


Figura 4.3 Retardador de mica. Los dos puntos diametralmente opuestos indican el eje del vector característico rápido (ver cap. 2).

Con respecto a este elemento el fabricante proporciona los datos de la tabla 4.3:

Tabla 4.3

Material	Mica
Retardo	$\lambda/4$
Tolerancia de retardo	$\lambda/50$
Grosor, t (mm)	3.5
Diámetro, ϕ (mm)	50
Tolerancia de ϕ (mm)	± 0.25

Este único retardador de $\lambda/4$ fue utilizado como parte del sistema para la caracterización de un EDP ya que, como se recordará, los otros dos retardadores de $\lambda/4$ y el de $\lambda/2$ fueron implementados con la fibra misma.

4.4 Fibra óptica (F-SV).

La fibra óptica que se usó es una fibra monomodo convencional de cristal de sólo tres capas (ver fig. 2.6, cap. 2) y que posee las especificaciones de la tabla 4.4:

Tabla 4.4

Longitud de onda de operación, λ (nm)	633
Perfil del índice de refracción	Escalonado
NA	0.11
Diámetro del núcleo (μm)	4.6
Diámetro del recubrimiento (μm)	125 ± 2
Diámetro del revestimiento (μm)	145 ± 15
Atenuación máxima (dB/km)	12.0
Longitud de onda de corte (nm)	580 ± 30
Índices de refracción Núcleo/revestimiento	1.4616/1.4571
Longitud total de la fibra (m)	20

4.5 Láser (05-LHP-111).

La fuente que se empleó es el láser de Helio-Neón. La longitud de onda común de esta fuente es 632.8nm y su popularidad o atractivo se debe a que es un dispositivo fácil de construir, es relativamente barato, muy confiable y en la mayoría de los casos se puede operar mediante un simple interruptor, además de que la luz que emite es generalmente linealmente polarizada. Sin embargo, existen las desventajas de su poca potencia y la dificultad de proveer un método conveniente de modulación lo cual provoca que este tipo de láser no sea utilizado como una fuente en los sistemas de comunicación que actualmente trabajan a 850nm (con fibras ópticas multimodo), 1300nm y 1550nm en diversas modalidades de fabricación. No es propósito de este documento explicar el funcionamiento de este dispositivo, pero se puede consultar en [21].

Las siguientes especificaciones, tabla 4.5, son particulares para el láser utilizado de acuerdo con su fabricante *Melles Griot*.

Tabla 4.5

Especificaciones de salida	
Mínima potencia de salida (mW)	1.00
Longitud de onda (nm)	632.8 (rojo)
Polarización	>500:1
Estabilidad puntual del haz (mrad)	
Al encender	<0.05
15 minutos después	<0.03

4.6 Medidor de potencia (1815-C).

El medidor de potencia que se utilizó es de la compañía *Newport* y tiene las características físicas indicadas en la tabla 4.6.

Tabla 4.6

Batería	6 baterías alcalinas de 1.5 V AA
Duración de la batería	130-180 hrs.
<i>Display</i>	3.5 dígitos, LCD
Velocidad de muestreo	2.5 Hz

Tabla 4.6 Continuación

Interruptor	6 posiciones
Ambiente de operación	18°C-28°C
Detectores compatibles	Detectores de baja potencia de <i>Newport</i> - excepto los modelos 818-F-SL, 818-F-IR

Para la operación y calibración de este dispositivo se cuenta con los siguientes controles (tabla 4.7):

Tabla 4.7

Control	Descripción	Comentarios
<i>POWER</i>	<i>Push</i> botón	Enciende o apaga el dispositivo.
<i>CAL</i>	<i>Push</i> botón	Despliega el valor del factor de calibración en el <i>display</i> .
<i>CAL ADJ</i>	Potenciómetro de 10 vueltas	Sirve para ajustar el valor de la mantisa del factor de calibración.
<i>ZERO</i>	Perilla de 10 vueltas	Ajusta el valor en el <i>display</i> a ceros. Se utiliza para eliminar las señales ambientales después de calibrar el instrumento.
<i>RANGE</i>	Perilla de 6 posiciones	Ajusta la ganancia.
<i>ACCEL ADJ</i>	Potenciómetro de 25 vueltas	Ajusta la constante de tiempo de la termopila.
<i>SETUP</i>	4 interruptores	Configura el medidor de acuerdo con el detector que se use. Esta serie de interruptores se encuentran en la parte trasera del medidor y cada uno de ellos puede tomar el valor de 1 ó 0.

Como puede notarse en la tabla 4.7 este dispositivo puede usarse con varios detectores sólo que la calibración se realiza específicamente para el detector que se vaya a emplear siguiendo para ello lo que se describe a continuación:

Se configura al medidor para el detector en particular mediante los cuatro interruptores, mencionados en la tabla 4.7, cuya posición (1 ó 0) está determinada por (tabla 4.8):

Tabla 4.8

Interruptor	Descripción																																
1 y 2	Sirven para seleccionar un detector de baja potencia (1,0) o uno de alta potencia (0,1).																																
3	Configura al medidor al valor del exponente del factor de calibración de acuerdo con lo siguiente:																																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Exponente del factor de calibración</th> <th>-2</th> <th>-1</th> <th>0</th> <th>+1</th> <th>+2</th> <th>+3</th> <th>+4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Detector de baja potencia</td> <td>0*</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1**</td> <td>NA</td> <td>NA</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Detector de baja potencia con atenuador</td> <td>NA</td> <td>NA</td> <td>NA</td> <td>0*</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1**</td> </tr> <tr> <td>Detector de alta potencia</td> <td>NA</td> <td>NA</td> <td>NA</td> <td>0*</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1**</td> </tr> </tbody> </table>	Exponente del factor de calibración	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	Detector de baja potencia	0*	0	1	1**	NA	NA	NA	Detector de baja potencia con atenuador	NA	NA	NA	0*	0	1	1**	Detector de alta potencia	NA	NA	NA	0*	0	1	1**
Exponente del factor de calibración	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4																										
Detector de baja potencia	0*	0	1	1**	NA	NA	NA																										
Detector de baja potencia con atenuador	NA	NA	NA	0*	0	1	1**																										
Detector de alta potencia	NA	NA	NA	0*	0	1	1**																										
	* Multiplicar la mantisa por 10 y volver a establecerla en el medidor.																																
	** Dividir la mantisa por 10 y volver a establecerla en el medidor.																																
4	Selecciona respuesta acelerada (1) o no acelerada (0). Este sólo debe ponerse a 1 para detectores de alta potencia (termopila).																																

De la tabla anterior es fácil determinar la posición de los interruptores 1, 2 y 4. Para el interruptor 3 es necesario conocer el factor de calibración (mantisa y exponente) que se obtiene calculando el inverso de la responsividad del detector (expresado en notación científica) a la λ en que se vaya a trabajar. Una vez conocido este valor se realizan los siguientes pasos:

- Oprimir el botón CAL.
- Ajustar con CAL ADJ hasta que el valor correcto de la mantisa se aprecie en el *display*.
- Desoprimir o liberar el botón CAL.
- Ajustar el valor del exponente del factor de calibración colocando el tercer interruptor a 1 ó 0 de acuerdo con la tabla 4.8.

Por ejemplo, para este trabajo se empleó un detector cuyo modelo es 818-SL (*Newport*) al que se agregó un atenuador (OD3, también de *Newport*) desmontable para no dañarlo al hacer incidir en él una potencia alta ya que el detector es un elemento de baja potencia, de silicio con un rango de operación de 0.4 a 1.1 μm . Este detector presenta la responsividad de la fig. 4.4, tabla 4.9 (para el detector sin atenuador ver [22]).

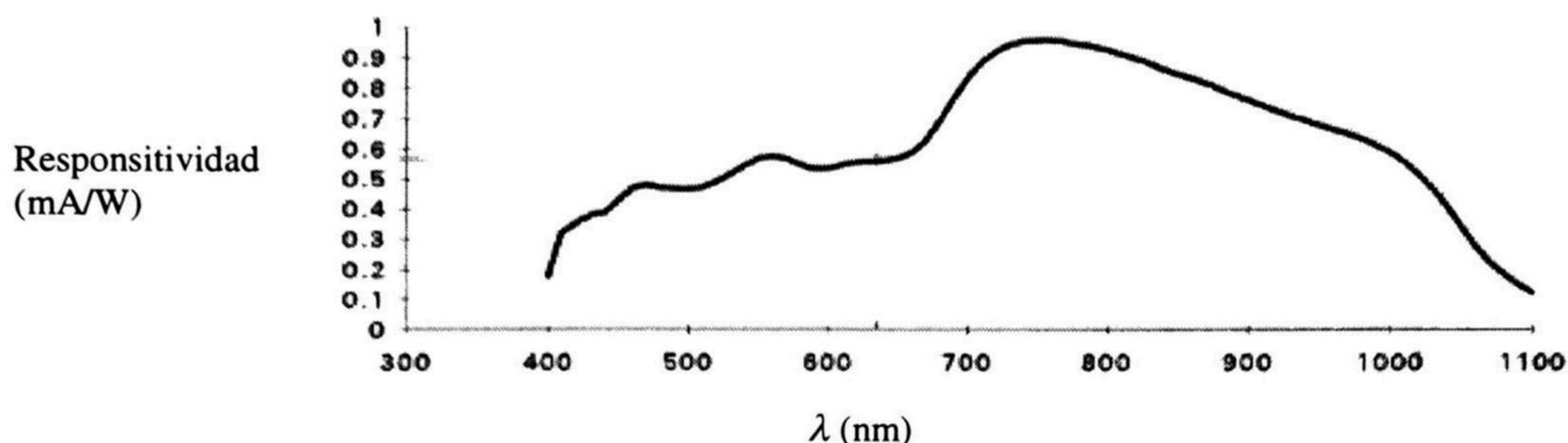


Figura 4.4 Detector con atenuador.

Tabla 4.9 Respositividad (mA/W). Detector con atenuador

λ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
400	0.1761	0.3222	0.3521	0.3796	0.3880	0.4283	0.4702	0.4785	0.4712	0.4649
500	0.4644	0.4719	0.4897	0.5151	0.5438	0.5666	0.5753	0.5661	0.5476	0.5331
600	0.5338	0.5430	0.5531	0.5584	0.5589	0.5650	0.5846	0.6266	0.6912	0.7643
700	0.8324	0.8851	0.9174	0.9394	0.9499	0.9422	0.9525	0.9483	0.9391	0.9305
800	0.9199	0.9063	0.8924	0.8742	0.8534	0.8400	0.8264	0.8080	0.7907	0.7721
900	0.7546	0.7366	0.7183	0.7036	0.6885	0.6717	0.6586	0.6437	0.6274	0.6059
1000	0.5810	0.5514	0.5091	0.4604	0.4012	0.3384	0.2714	0.2193	0.1804	0.1466
1100	0.1181									

Por lo tanto el factor de calibración resulta del inverso de los valores anteriores por lo que para $\lambda=632.8\text{nm}$ este factor es 1.79^{+3} (tabla 4.10, valor sombreado), con lo cual los cuatro interruptores del medidor quedan con los valores 1,0,1,0 para este detector a esta λ .

Tabla 4.10. Factor de calibración para λ en el rango 600-690nm

λ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
600	1.87^{+3}	1.84^{+3}	1.81^{+3}	1.79^{+3}	1.79^{+3}	1.77^{+3}	1.71^{+3}	1.60^{+3}	1.45^{+3}	1.31^{+3}

Capítulo 5

Resultados obtenidos en el sistema con los métodos de medición y con el controlador de polarización (CP) a distintos estados de polarización

En este capítulo se explica cómo se calculan los ángulos a los que deben colocarse los elementos del CP. Se comparan los métodos presentados en el capítulo 3 y finalmente se muestran algunas mediciones obtenidas en el sistema.

5.1 Algoritmo para el cálculo de los ángulos del controlador de polarización (CP).

Como ya se ha mencionado se utilizó el lenguaje C para implementar el código, que tiene el algoritmo a continuación, con el que se determina la posición angular de los dispositivos del CP.

1. Preguntar el azimut (α) del EDP ideal que se tiene a la entrada de la fibra. Con α se forma el vector de *Stokes* del EDP (x , ver fig. 5.1) con lo escrito en 3.1 vector (c), el valor de e se toma igual a cero debido a que se trata de un EDP lineal, mismo que no proviene de medición alguna.
2. Preguntar los valores de las tres componentes (Q , U , V) del vector de la **medición 2** (y , ver fig. 5.1) misma que se explica más adelante en este capítulo, el valor del primer elemento I , se iguala a 1 debido a que se trabaja con vectores normalizados.
3. Una vez que se tienen los dos vectores anteriores, se busca la solución del sistema tal que:

$$My=x$$

Donde $M=M_1M_2M_3$ (x se definió en el punto 1 del algoritmo y y en el 2).

$M_1M_2M_3$ son matrices que se determinan haciendo $\delta = 90^\circ$ para los retardadores de $\lambda/4$ y $\delta = 180^\circ$ para el de $\lambda/2$ en la matriz proporcionada en 3.11 (capítulo 3), con lo cual M_1 y M_2 quedan como en 5.1 y M_3 como en 5.2.

$$M_1 = M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\rho) & \sin(2\rho)\cos(2\rho) & -\sin(2\rho) \\ 0 & \sin(2\rho)\cos(2\rho) & \sin^2(2\rho) & \cos(2\rho) \\ 0 & \sin(2\rho) & -\cos(2\rho) & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(4\rho) & \sin(4\rho) & 0 \\ 0 & \sin(4\rho) & -\cos(4\rho) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

El orden del producto se hace premultiplicando la matriz que primero se encuentra la luz (fig. 5.1) por la que le sigue y así consecutivamente [5]. Por lo tanto en el sistema físico la luz se ve afectada primero por M_3 , después por M_2 y finalmente por M_1 .

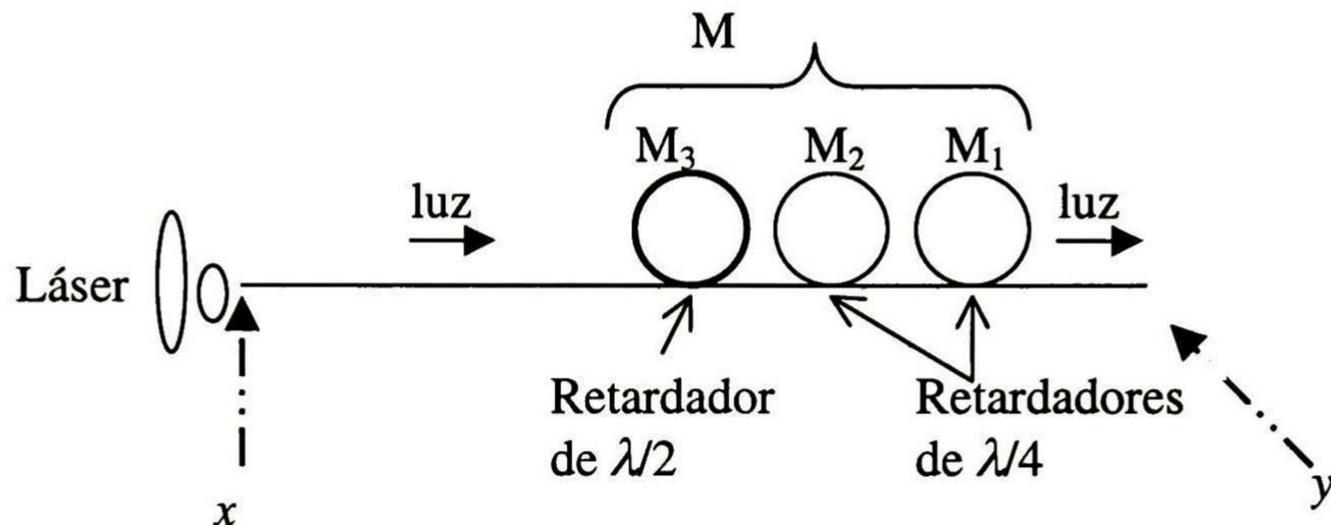


Figura 5.1 Arreglo de retardadores.

4. Se anidan entonces tres ciclos para ir variando ρ desde 0° hasta 180° (que es igual a tomar el rango de -90° a 90°) en las matrices (5.1) y (5.2) con un incremento de 0.5° hasta encontrar los valores que convierten a y en x .

En cada iteración se verifica si se tiene el resultado deseado, de ser así se presentan los ángulos en pantalla y se abortan los ciclos. De no cumplirse lo anterior se revisa si con los ángulos que se tienen en ese momento las componentes del vector son 0.01 mayores o menores que las del vector ideal para guardar los ángulos y continuar con los ciclos, al terminar todas las iteraciones se despliega el resultado obtenido con los ángulos respaldados como una alternativa. Adicionalmente en cada iteración se va guardando la menor suma de diferencias entre los elementos del vector que se obtendría al girar el CP y x , así como los ángulos que la generan, de manera que si ninguna de las situaciones previas tiene lugar se presenta a la menor diferencia con sus respectivos ángulos como la opción más cercana.

El incremento de ángulo se puede hacer menor, por ejemplo 0.1 ó 0.01, para obtener resultados simulados más parecidos al EDP ideal pero físicamente no era factible colocar algún elemento del CP con una inclinación de 43.1 ó 34.04, debido a que los

elementos que sirven de referencia para girar están marcados cada grado, por lo que no tendría objeto hacer más lento el cálculo de ángulos que no se podían lograr.

5.2 Comparación de los resultados obtenidos con los cinco métodos para generar el vector de *Stokes*.

Se informan a manera de tabla (tabla 5.1) algunos de los vectores de *Stokes* conformados a partir de mediciones llevadas a cabo a la entrada de la fibra utilizando todos los métodos del capítulo 3. Se agrega además el azimut y la elipticidad para una mejor comparación.

Tabla 5.1

Vector Ideal	Mediciones (μW)	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\alpha=45^\circ$ $e=0.0$	$I_0 = 0.285$ $I_{90} = 0.278$ $I_{45} = 0.563$ $I_{-45} = 0.001$ $I_{-89} = 0.260$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.0124 \\ 0.9982 \\ 0.0177 \end{bmatrix}$ $\alpha=44.6^\circ$ $e=0.0088$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.0124 \\ 0.9982 \\ 0.00 \end{bmatrix}$ $\alpha=44.64^\circ$ $e=0.0$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.0124 \\ 0.9982 \\ 0.4596 \end{bmatrix}$ $\alpha=44.6^\circ$ $e=0.2434$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.0124 \\ 0.9982 \\ 0.0575 \end{bmatrix}$ $\alpha=44.6^\circ$ $e=0.0287$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.0410 \\ 0.9930 \\ -0.1050 \end{bmatrix}$ $\alpha=43.8^\circ$ $e=0.0540$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\alpha=-45^\circ$ $e=0.0$	$I_0 = 0.272$ $I_{90} = 0.269$ $I_{45} = 0.001$ $I_{-45} = 0.531$ $I_{-89} = 0.283$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0055 \\ -0.9796 \\ -0.0073 \end{bmatrix}$ $\alpha=-44.8^\circ$ $e=0.0036$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0055 \\ -0.9796 \\ 0.0 \end{bmatrix}$ $\alpha=-44.8^\circ$ $e=0.0$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0055 \\ -0.9796 \\ 0.6159 \end{bmatrix}$ $\alpha=-44.8^\circ$ $e=0.3444$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0055 \\ -0.9796 \\ 0.1916 \end{bmatrix}$ $\alpha=-44.8^\circ$ $e=0.1008$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0300 \\ -0.9960 \\ -0.0730 \end{bmatrix}$ $\alpha=-45.8^\circ$ $e=0.0380$

Tabla 5.1 Continuación

Vector Ideal	Mediciones (μW)	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ -0.8660 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$I_0 = 0.110$ $I_{90} = 0.039$ $I_{45} = 0.009$ $I_{-45} = 0.137$ $I_{-89} = 0.043$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.4765 \\ -0.8590 \\ 0.0402 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.4765 \\ -0.8590 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.4765 \\ -0.8590 \\ 0.1873 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.4765 \\ -0.8590 \\ 0.1812 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.4650 \\ -0.8840 \\ -0.0350 \end{bmatrix}$
$\alpha = -30^\circ$ $e = 0.0$		$\alpha = -30.49^\circ$ $e = 0.0201$	$\alpha = -30.77^\circ$ $e = 0.0$	$\alpha = -30.49^\circ$ $e = 0.0944$	$\alpha = -30.49^\circ$ $e = 0.0913$	$\alpha = -31.1^\circ$ $e = 0.0190$
$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.3420 \\ 0.9396 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$I_0 = 0.136$ $I_{90} = 0.283$ $I_{45} = 0.415$ $I_{-45} = 0.012$ $I_{-89} = 0.279$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.3508 \\ 0.9618 \\ 0.0071 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.3508 \\ 0.9618 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.3508 \\ 0.9618 \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.3508 \\ 0.9618 \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.3390 \\ 0.9360 \\ -0.0910 \end{bmatrix}$
$\alpha = 55^\circ$ $e = 0.0$		$^1\alpha = 55.02^\circ$ $e = 0.0035$	$\alpha = 55.26^\circ$ $e = 0.0$	$\alpha = 55.02^\circ$ $e = *$	$\alpha = 55.02^\circ$ $e = *$	$\alpha = 54.9^\circ$ $e = 0.0470$
$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7660 \\ -0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$I_0 = 0.065$ $I_{90} = 0.507$ $I_{45} = 0.104$ $I_{-45} = 0.468$ $I_{-89} = 0.520$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7727 \\ -0.6363 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7727 \\ -0.6363 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7727 \\ -0.6363 \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7727 \\ -0.6363 \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7640 \\ -0.6340 \\ -0.1110 \end{bmatrix}$
$\alpha = -70^\circ$ $e = 0.0$		$^2\alpha = -70.27^\circ$ $e = 0.0$	$\alpha = -70.3^\circ$ $e = 0.0$	$\alpha = -70.27^\circ$ $e = *$	$\alpha = -70.27^\circ$ $e = *$	$\alpha = -70.14^\circ$ $e = 0.0570$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7660 \\ 0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$I_0 = 0.514$ $I_{90} = 0.066$ $I_{45} = 0.463$ $I_{-45} = 0.102$ $I_{-89} = 0.040$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7724 \\ 0.6224 \\ 0.0051 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7724 \\ 0.6224 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7724 \\ 0.6224 \\ 0.1267 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7724 \\ 0.6224 \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7680 \\ 0.6320 \\ -0.0990 \end{bmatrix}$
$\alpha = 20^\circ$ $e = 0.0$		$\alpha = 19.43^\circ$ $e = 0.0025$	$\alpha = 19.71^\circ$ $e = 0.0$	$\alpha = 19.43^\circ$ $e = 0.0636$	$\alpha = 19.43^\circ$ $e = *$	$\alpha = 19.73^\circ$ $e = 0.0510$

Tabla 5.1 Continuación

Vector ideal	Mediciones (μW)	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5
$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7660 \\ 0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$I_0 = 0.073$ $I_{90} = 0.510$ $I_{45} = 0.486$ $I_{-45} = 0.101$ $I_{-89} = 0.503$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7495 \\ 0.6603 \\ -0.0085 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7495 \\ 0.6603 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7495 \\ 0.6603 \\ 0.0533 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7495 \\ 0.6603 \\ 0.0449 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7590 \\ 0.6450 \\ -0.0810 \end{bmatrix}$
$\alpha=70^\circ$ $e=0.0$		³ $\alpha=69.32^\circ$ $e=0.0042$	$\alpha=69.27^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=69.32^\circ$ $e=0.026$	$\alpha=69.32^\circ$ $e=0.0224$	$\alpha=69.8^\circ$ $e=0.0420$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7660 \\ -0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$I_0 = 0.550$ $I_{90} = 0.073$ $I_{45} = 0.111$ $I_{-45} = 0.526$ $I_{-89} = 0.088$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7656 \\ -0.6661 \\ -0.0048 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7656 \\ -0.6661 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7656 \\ -0.6661 \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7656 \\ -0.6661 \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7650 \\ -0.6400 \\ -0.0590 \end{bmatrix}$
$\alpha=-20^\circ$ $e=0.0$		$\alpha=-20.5^\circ$ $e=0.0024$	$\alpha=-20.01^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=-20.5^\circ$ $e=*$	$\alpha=-20.5^\circ$ $e=*$	$\alpha=-19.96^\circ$ $e=0.0310$

*Valores fuera de rango, ¹ el valor que se obtiene es -34.98° al que se le suman 90° con lo que se obtiene el resultado anotado, ² el valor que se obtiene es -19.73° al que se le restan 90° , ³ el valor que se obtiene es -20.68° al que se le suman 90° .

Como puede notarse el método 1 representa una buena opción, pero en ocasiones como las que se resaltan en la tabla anterior, el valor de α puede traer problemas, conflictos que con conocimiento y familiarización con el método, además de la interpretación de los datos obtenidos, no tienen mayor trascendencia. La segunda alternativa es el método 5, el cual no presenta problemas para calcular α . Los otros métodos pueden descartarse (a pesar de ser algebraicamente correctos) debido a los datos que se obtienen con ellos, en particular el 2 es útil como se mencionó en su definición sólo para EDP lineales.

5.3 Mediciones

En este punto se presentan mediciones realizadas con el sistema físico así como los vectores que se generan a partir de ellas, con estos resultados se prueba que el CP

recupera o logra una buena aproximación del EDP que se desea tener (x), se verifica además que a una posición dada el CP restablece dos estados de polarización ortogonales. Recordar que esto último resulta útil en telecomunicaciones cuando el enlace sea coherente no importando el tipo de modulación o, cuando ésta sea por PolSK o DPolSK donde el caso más sencillo se presenta cuando en la transmisión de datos digitales por fibra óptica se fija al cero un EDP y al uno el EDP ortogonal al que se asignó al cero.

Ahora bien, para cada par de estados de polarización se hicieron cinco mediciones (de aquí en adelante la palabra medición se utiliza para referirse al registro de 21 intensidades) en el sistema, para todas ellas se registraron las intensidades a 45° y -45° y desde los 0° hasta los 180° con un paso de 10° . Estas cinco mediciones se realizaron en dos diferentes posiciones en el sistema (entrada y salida de la fibra) de acuerdo con lo que sigue:

- **Medición 1.** A la entrada de la fibra, después del polarizador que asegura un EDP inicial conocido.
- **Medición 2.** En la salida de la fibra con el CP a 0° para obtener el EDP desconocido hasta este momento, provocado a la luz por su paso en la fibra óptica monomodo común.
- **Medición 3.** En la salida de la fibra con el CP girado a los ángulos calculados a partir de los vectores de *Stokes* de la medición anterior y del EDP ideal del vector logrado con la medición 1. En esta medición se espera poder recobrar x tanto como sea posible.
- **Medición 4.** A la entrada de la fibra, después del polarizador con un EDP ortogonal al de la medición 1.
- **Medición 5.** En la salida de la fibra con el CP girado a los mismos ángulos que en la medición 3. Con estas medidas se espera formar el EDP que se acopló a la fibra en la medición 4.

A partir de este momento en los datos que se proporcionan se usan las palabras medición 1,2...5 para indicar la posición e interpretación definida en los párrafos anteriores. Así mismo los vectores de *Stokes* que aparecen en el resto del capítulo que no representan EDP ideales fueron obtenidos con el método de medición 1 descrito en el capítulo 3.

5.3.1 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 90° y 0° .

El primer resultado que se presenta corresponde a luz con un EDP lineal, con $\alpha=90^\circ$ cuyo vector de *Stokes* ideal se muestra en 5.3, pero el vector en 5.4 es el que se obtuvo en la entrada de la fibra al realizar la medición 1.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$\alpha=90^\circ$ y $e=0.0$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.9965 \\ 0.0276 \\ -0.0294 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$\alpha=89.2^\circ$, $e=0.0147$

Al concluir la medición 2 se formó el vector siguiente:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.4725 \\ 0.8571 \\ -0.0989 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$\alpha=30.56^\circ$ y $e=0.049$

Como puede notarse el vector en 5.5, su elipticidad y azimut no son valores cercanos a lo arrojado por la medición 1 (5.4) y mucho menos al EDP ideal. Por lo tanto se hizo necesario colocar el CP a una posición tal que el vector en 5.5 se aproxime al EDP ideal. Con la ayuda del programa, explicado al principio de este capítulo, se determinó que el retardador de $\lambda/2$ debía girarse a un ángulo de -34° , para los de $\lambda/4$ los ángulos fueron 45.5° y -35.5° ; con lo que se obtendría el resultado a continuación:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.9837 \\ 0.0000 \\ -0.0001 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$\alpha=90^\circ$ y $e=0.00005$

Que como puede verse no es exactamente el de la expresión en 5.4, ni el ideal, pero manifiesta un excelente resultado, sin embargo no todo es simulación, así con el sistema físico se generó el vector 5.7 a través de la medición 3.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.9775 \\ -0.0561 \\ -0.0112 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$\alpha=88.35^\circ$ y $e=0.0056$

Lo cual nos representa un EDP que de nueva cuenta no es el mismo que en 5.6, aunque continúa siendo un valioso resultado ya que posee una gran similitud con el vector en 5.4 que recordando es el que se tiene a la entrada de la fibra según la medición 2. Después se efectúa la medición 4 (vector 5.9) con el EDP ortogonal a 90° para lo cual se giran el láser y el polarizador de entrada, por lo tanto se trabaja ahora con el nuevo EDP representado idealmente por el vector 5.8.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$\alpha=0^\circ$ y $e=0.0$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.9968 \\ 0.0143 \\ 0.0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$\alpha=0.410^\circ$ y $e=0.0$

Y, finalmente con la quinta medición se formó 5.10 que no es un resultado muy alejado del vector 5.9 por lo que se considera favorable.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.9629 \\ 0.0370 \\ 0.0370 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$\alpha=1.1^\circ$ y $e=0.018$

Otra manera interesante para apreciar estos resultados es la forma gráfica que se muestra a continuación en las figuras. 5.2 y 5.3.

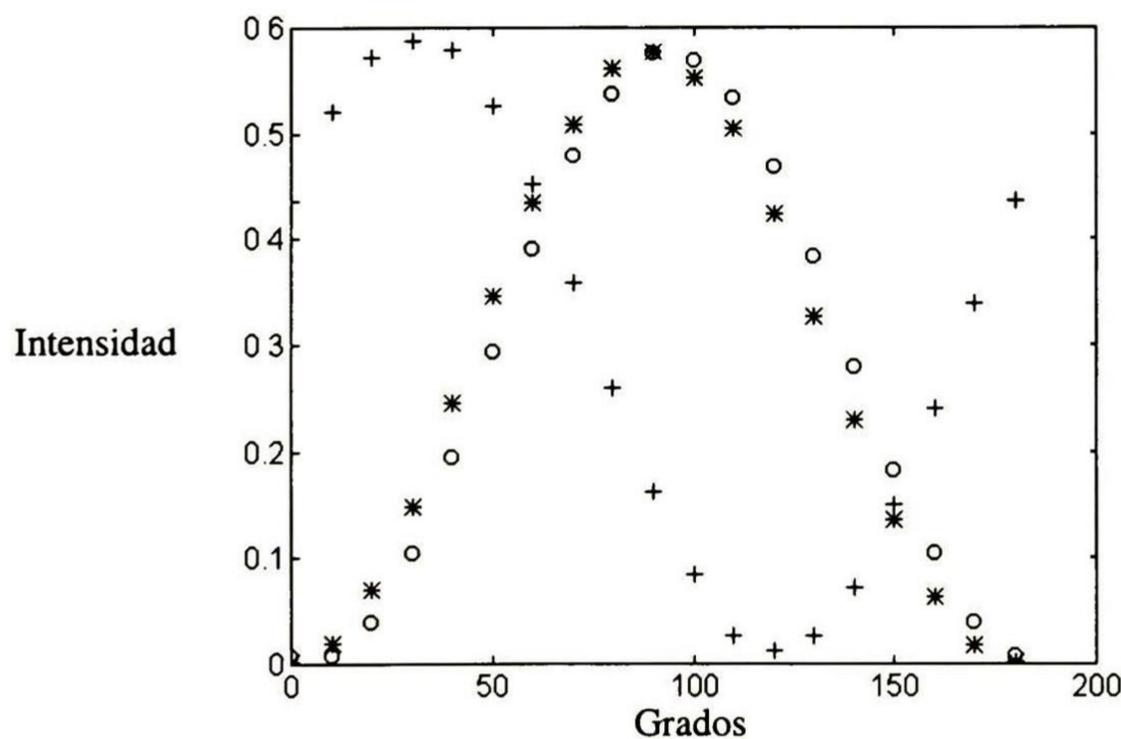


Figura 5.2. Representación gráfica de los resultados al estado de polarización lineal con $\alpha=90^\circ$. La señal trazada con * corresponde a la medición 1, el símbolo de + se emplea para la medición 2 y la "o" para los datos de la medición 3.

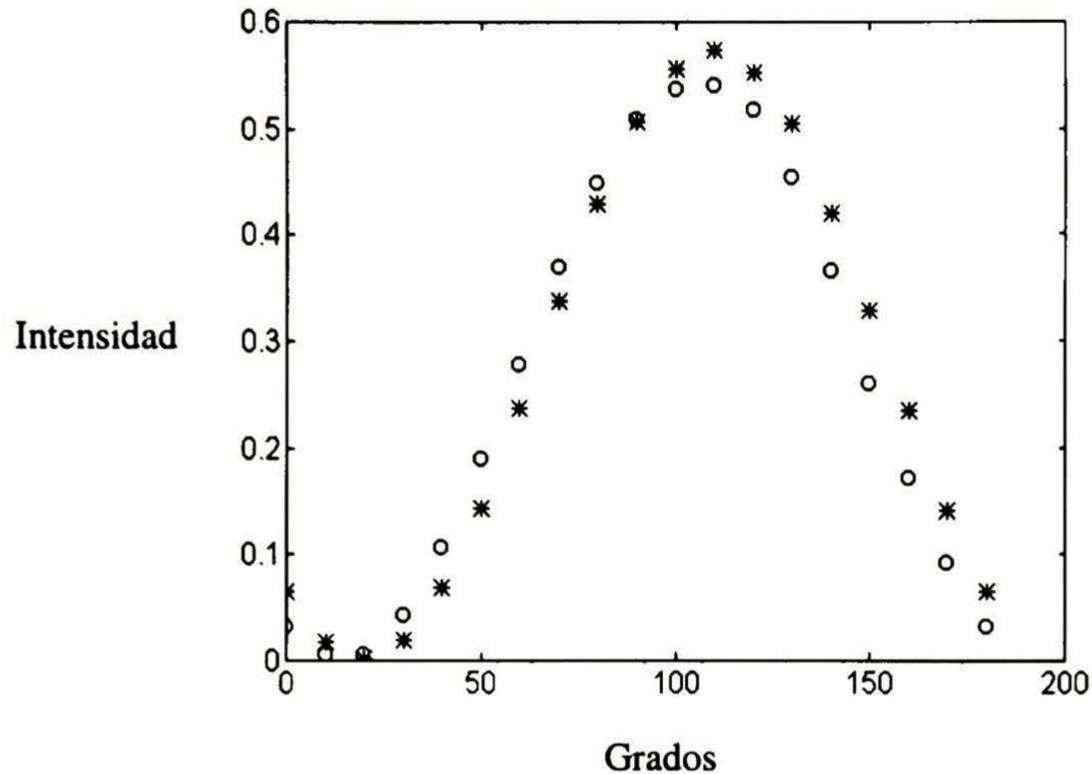


Figura 5.3. Gráfica de los resultados al estado de polarización lineal con $\alpha=0^\circ$. La señal trazada con * corresponde a la medición 4 y el símbolo de "o" se emplea para los datos de la medición 5.

Una vez detallado el procedimiento y relación entre los vectores los próximos datos se presentarán de manera breve.

5.3.2 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 45° y -45° .

Los resultados logrados para estos estados de polarización se muestran en la tabla 5.2. Los ángulos calculados para los elementos del CP con el fin de recobrar estas polarizaciones son: $\rho=-87^\circ$ para el retardador de $\lambda/2$ y $\rho=68.5^\circ$ y 58.5° para los de $\lambda/4$.

Tabla 5.2

Vector ideal del EDP de la entrada	Vector obtenido con la medición 1	Vector de la medición 2	Vector determinado por el programa.	Vector formado con la medición 3	Vector ideal del EDP de la entrada (ortogonal al primero)	Vector de la medición 4	Vector obtenido con la medición 5
$\alpha=45^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=44.6^\circ$ $e=0.0088$	$\alpha=13.28^\circ$ $e=0.1503$	$\alpha=44.98^\circ$ $e=0.0002$	$\alpha=43.26^\circ$ $e=0.0294$	$\alpha=-45^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=-44.8^\circ$ $e=0.0036$	$\alpha=-42.14^\circ$ $e=0.0161$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.0124 \\ 0.9982 \\ 0.0177 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.8235 \\ -0.4117 \\ 0.2941 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0004 \\ 0.9665 \\ -0.0005 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.0588 \\ 0.9705 \\ 0.0588 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0055 \\ -0.9796 \\ -0.0073 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0967 \\ -0.9677 \\ 0.0322 \end{bmatrix}$

Las gráficas que ilustran estos resultados se muestran en las figuras 5.4 y 5.5.

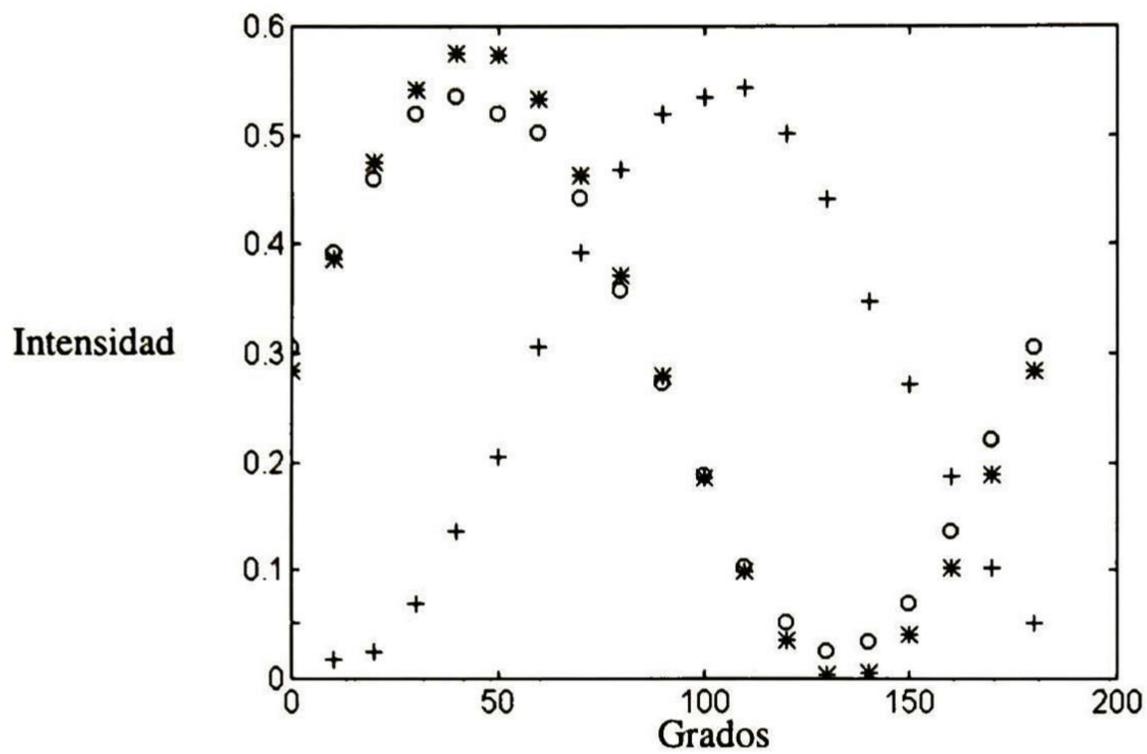


Figura 5.4. Gráfica de los datos del EDP lineal con $\alpha=45^\circ$. Los puntos con * corresponden a la medición 1, el caracter + se usa para la medición 2 y la "o" en los datos de la medición 3.

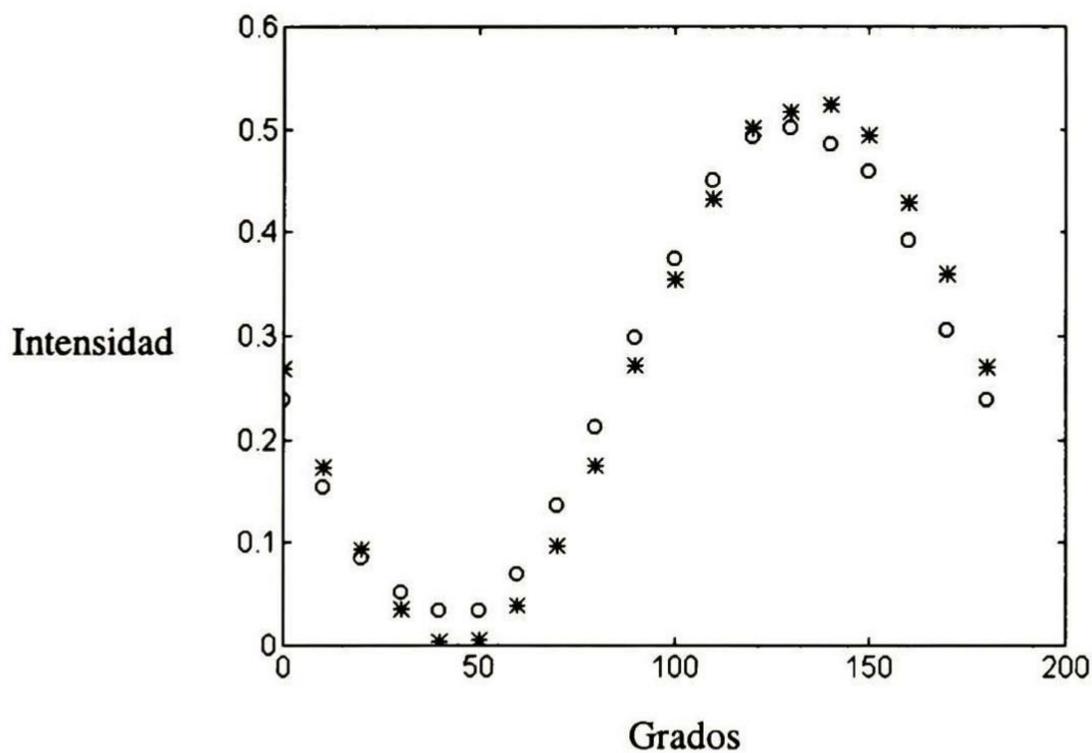


Figura 5.5. Gráfica de los resultados del EDP lineal con $\alpha=-45^\circ$. La señal trazada con * corresponde a la medición 4 y la "o" se emplea para los datos de la medición 5.

5.3.3 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 20° y -70° .

Los datos obtenidos para estos estados de polarización se muestran en la tabla 5.3, los ángulos calculados para los elementos del CP son: $\rho=6^\circ$ para el retardador de $\lambda/2$ y $\rho=-73^\circ$ y -42.5° para los de $\lambda/4$.

Tabla 5.3

Vector ideal del EDP de la entrada	Vector obtenido con la medición 1	Vector formado con la medición 2	Vector determinado por el programa.	Vector de la medición 3	Vector ideal del EDP de la entrada (ortogonal al primero)	Vector de la medición 4	Vector obtenido con la medición 5
$\alpha=20^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=19.43^\circ$ $e=0.0025$	$\alpha=39.72^\circ$ $e=0.272$	$\alpha=21.35^\circ$ $e=0.00005$	$\alpha=20.96^\circ$ $e=0.0149$	$\alpha=-70^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=-69.8^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=-70.3^\circ$ $e=0.0$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7660 \\ 0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7724 \\ 0.6224 \\ 0.0051 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.1466 \\ -0.7866 \\ 0.5066 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.6959 \\ 0.6424 \\ -0.0001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7313 \\ 0.6567 \\ 0.0298 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7660 \\ -0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7727 \\ -0.6363 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7521 \\ -0.6410 \\ 0.0 \end{bmatrix}$

Las gráficas siguientes ilustran estos resultados.

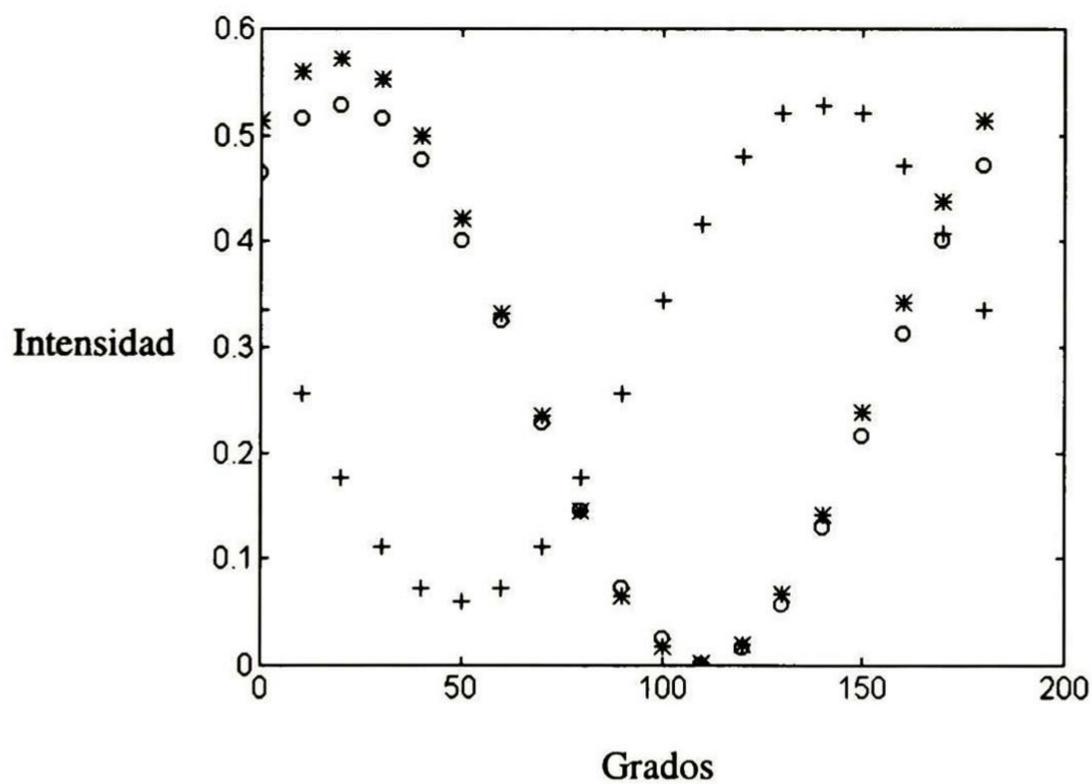


Figura 5.6. Gráfica con los resultados obtenidos para el EDP lineal con $\alpha=20^\circ$. Los * corresponden a los datos de la medición 1, el carácter + se utiliza para los de la medición 2 y la "o" en los datos de la medición 3.

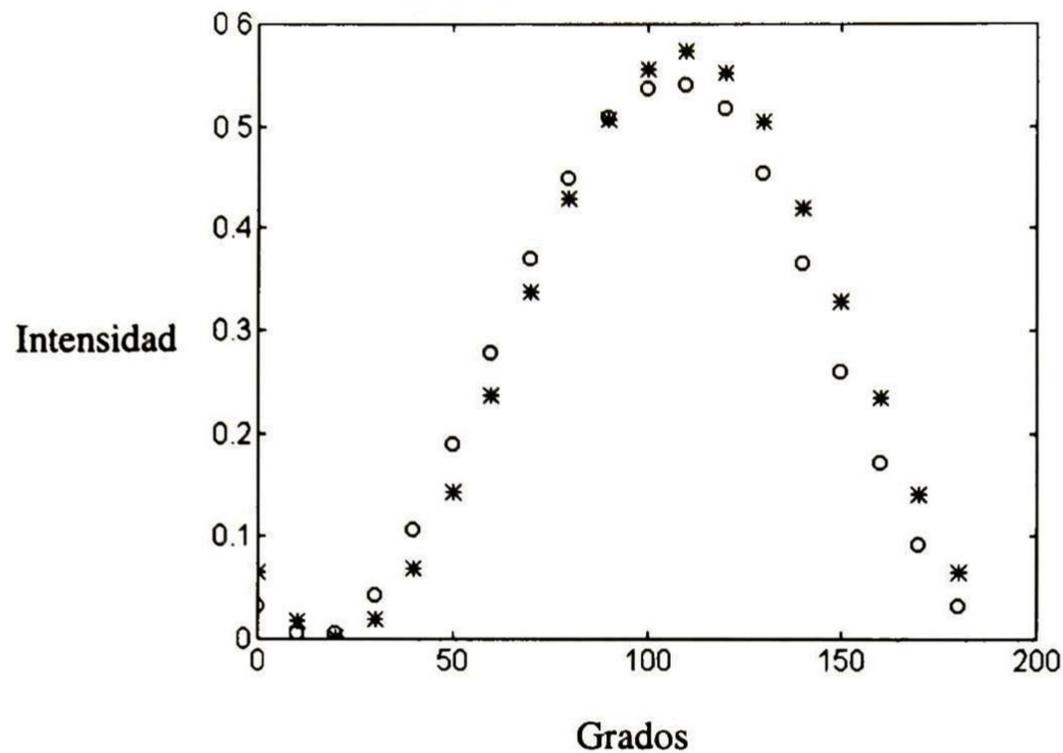


Figura 5.7. Gráfica de los resultados al EDP lineal con $\alpha=-70^\circ$. La señal trazada con * corresponde a la medición 4 y la "o" se emplea para los datos de la medición 5.

5.3.4 EDP lineal ($e=0$) con azimut de 70° y -20° .

Los resultados que se lograron para estos dos estados de polarización ortogonales se muestran en la tabla 5.4, los ángulos calculados para los componentes del CP son: $\rho=43^\circ$ para el retardador de $\lambda/2$ y $\rho=124.5^\circ$ y 0° para los de $\lambda/4$.

Tabla 5.4

Vector ideal del EDP de la entrada	Vector de la medición 1	Vector obtenido con la medición 2	Vector determinado por el programa.	Vector generado con la medición 3	Vector ideal del EDP de la entrada (ortogonal al primero)	Vector de la medición 4	Vector formado con la medición 5
$\alpha=70^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=69.32^\circ$ $e=0.0042$	$\alpha=-5^\circ$ $e=0.4215$	$\alpha=70.17^\circ$ $e=0.0001$	$\alpha=69.41^\circ$ $e=0.0227$	$\alpha=-20^\circ$ $e=0.0$	$\alpha=-20.5^\circ$ $e=0.0024$	$\alpha=-20.38^\circ$ $e=0.0256$
$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7660 \\ 0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7495 \\ 0.6603 \\ -0.0085 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.6818 \\ -0.125 \\ 0.7159 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7670 \\ 0.6362 \\ 0.0003 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7272 \\ 0.6363 \\ 0.0454 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7660 \\ -0.6427 \\ 0.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7656 \\ -0.6661 \\ -0.0048 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.7435 \\ -0.6410 \\ -0.0512 \end{bmatrix}$

Las gráficas 5.8 y 5.9 ilustran estos resultados.

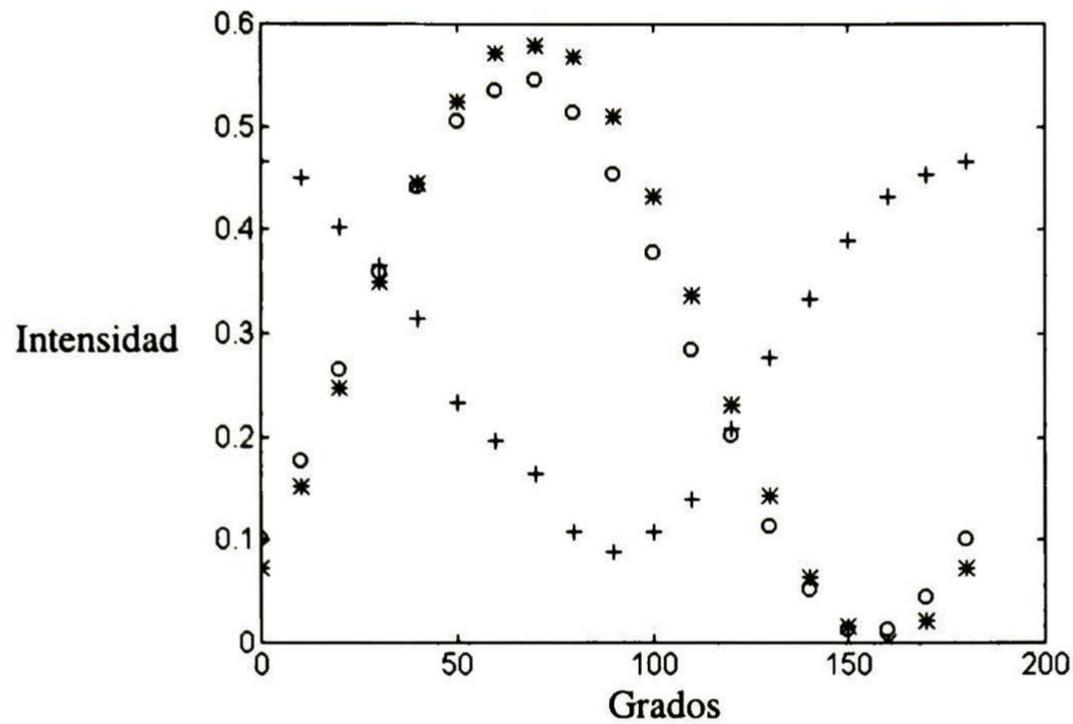


Figura 5.8. Representación gráfica de los resultados que se obtuvieron para el EDP lineal con $\alpha=70^\circ$. La señal trazada con * corresponde a la medición 1, el caracter + se emplea para los de la medición 2 y la "o" para ilustrar las intensidades de la medición 3.

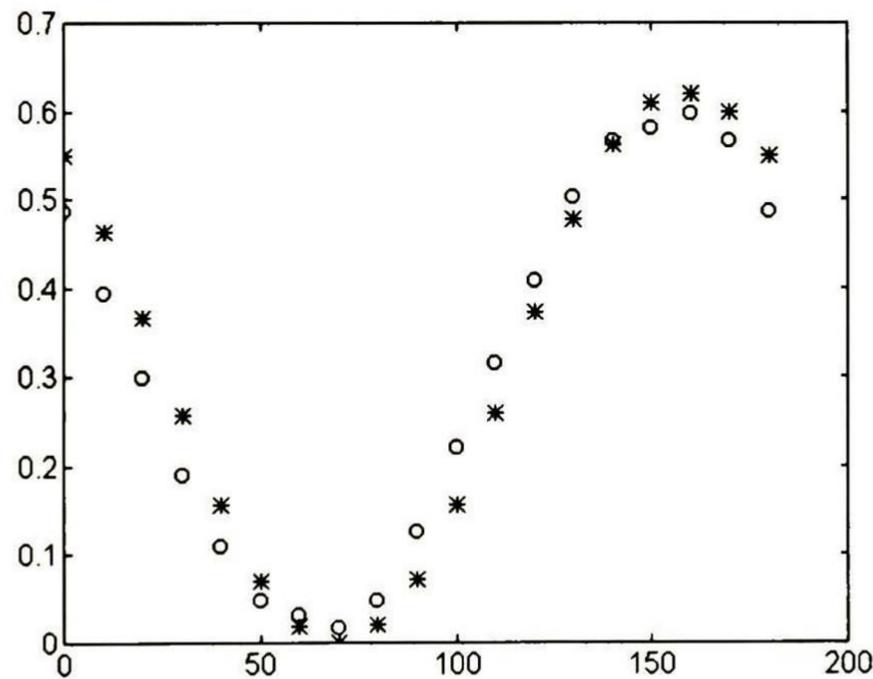


Figura 5.9. Gráfica de los resultados al EDP lineal con $\alpha=-20^\circ$ La señal trazada con * corresponde a la medición 4 y la "o" se emplea para los datos de la medición 5.

Capítulo 6

Sistema simulado y resultados logrados en él

En este capítulo se presenta el sistema que fue simulado en el software *BroadNeD* y algunos de los resultados obtenidos con éste, se revisa también un ejemplo sobre cómo determinar el efecto que causa un retardador a un EDP con la ayuda de la esfera de *Poincaré* esto debido a que es ésta la herramienta que emplea *BroadNeD* para presentar los datos.

6.1 Sistema simulado.

En la figura 6.1 se muestra el sistema completo en el que se realizaron las simulaciones.

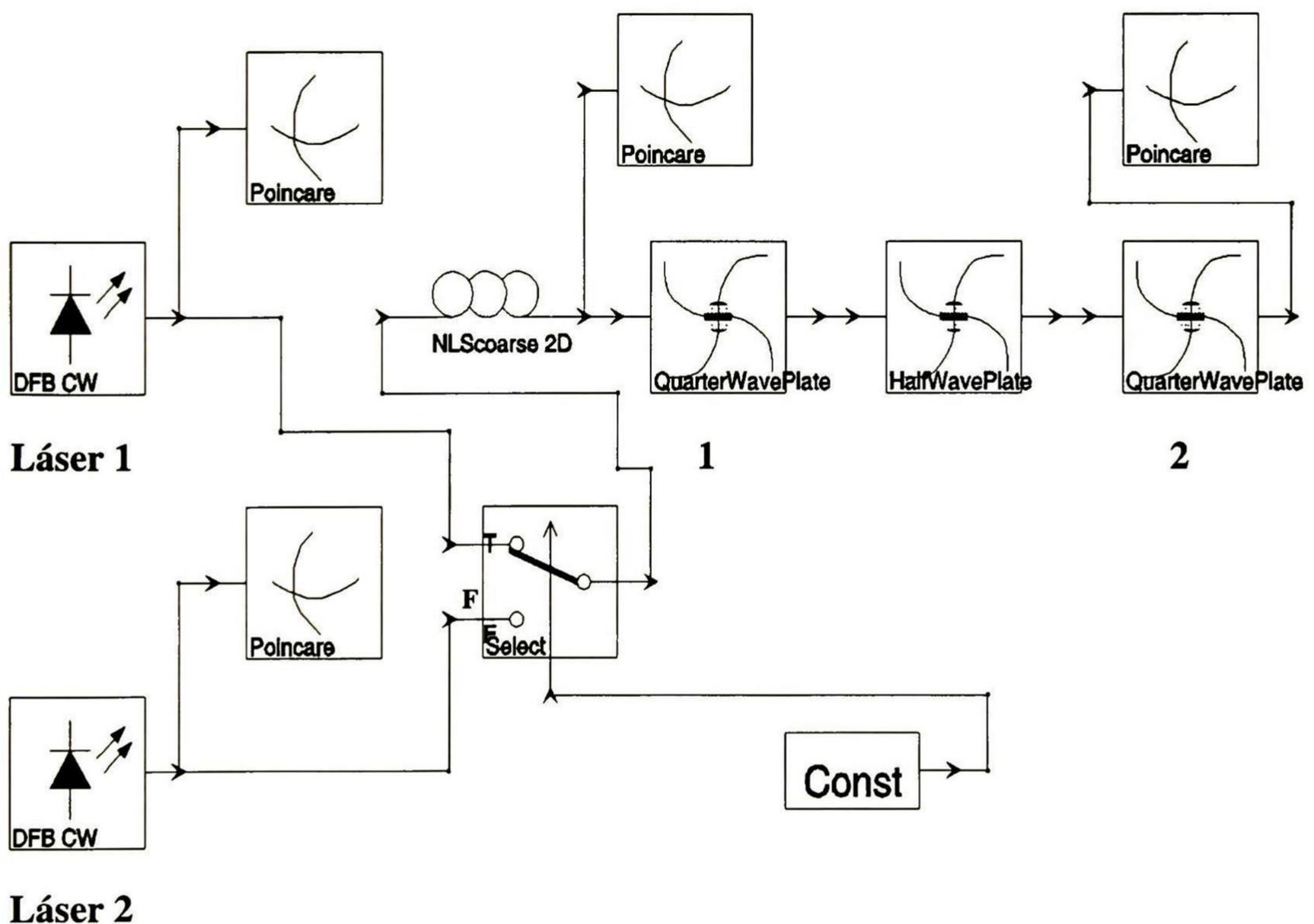


Figura 6.1 Sistema utilizado en las simulaciones

Se expone a continuación una breve explicación de los componentes de la figura anterior para dar la idea general de la función que estos desempeñan.

- El módulo *Poincare* es un visualizador que grafica con un punto en la esfera el EDP que se tiene en un determinado lugar. Proporciona además el valor de las componentes Q , U y V del vector de *Stokes*.
- El módulo *DFB CW (Continuous Wave)* pertenece a un láser linealmente polarizado en el cual α es un parámetro modificable. De este modo al variar α se generan diferentes EDP lineales.
- La fibra está caracterizada por *NLScoarse2D* y posee datos variables como la longitud, la atenuación, etc.
- El bloque *Select* es un interruptor que conmuta a F cuando el valor de control proporcionado, en este caso, por *Const* es cero y a T cuando el valor es 1.
- *Const* toma el valor que el usuario le asigne.
- Los módulos *QuarterWavePlate* y *HalfWavePlate* caracterizan retardadores de $\lambda/4$ ($\delta=90^\circ$) y de $\lambda/2$ ($\delta=180^\circ$) respectivamente. Su posición se determina al dar valor a ρ .

Como puede verse en la figura anterior se utilizaron dos láseres en el arreglo con el fin de contar con dos fuentes cuyos EDP fueran ortogonales y corroborar así fácilmente si el CP trabaja adecuadamente en la recuperación de ambos, ya que sólo era necesario variar el valor de *Const* (1 ó 0) para transmitir la señal de la fuente deseada. Este sistema de la figura 6.1 puede ser utilizado en un enlace de comunicaciones digitales con modulación PolSK binaria, para lo cual se utilizaría sólo un láser y un modulador electro-óptico con el que se generarían a partir de la luz de la fuente los dos estados de polarización ortogonales a los cuales se fijaría la posición del CP.

6.2 Ejemplo del manejo de la esfera de *Poincaré*.

Se examina a continuación un ejemplo sencillo para observar cómo estimar con la esfera de *Poincaré* el efecto que sufre la luz linealmente polarizada al chocar con un retardador.

Problema. Se tiene luz con un EDP lineal horizontal ($\alpha=0^\circ$) misma que se hace incidir en un retardador de $\lambda/4$ ($\delta=90^\circ$) cuyo eje rápido está a 45° ($\rho=45^\circ$), se desea saber qué EDP tendrá la luz después de éste.

Solución. Se realizan los pasos 1 y 2 del procedimiento descrito en 3.3 para ubicar la posición del punto P_1 que representa el EDP antes del retardador y el punto R para este último, los cuales se muestran en la figura 6.2 ($s_1=Q$, $s_2=U$, $s_3=V$). Después, se traza un arco de longitud 90° ($\delta=90^\circ$) en el sentido de las manecillas del reloj, el punto final P_2 del arco especifica el EDP después del retardador, en este caso es un EDP circular derecho.

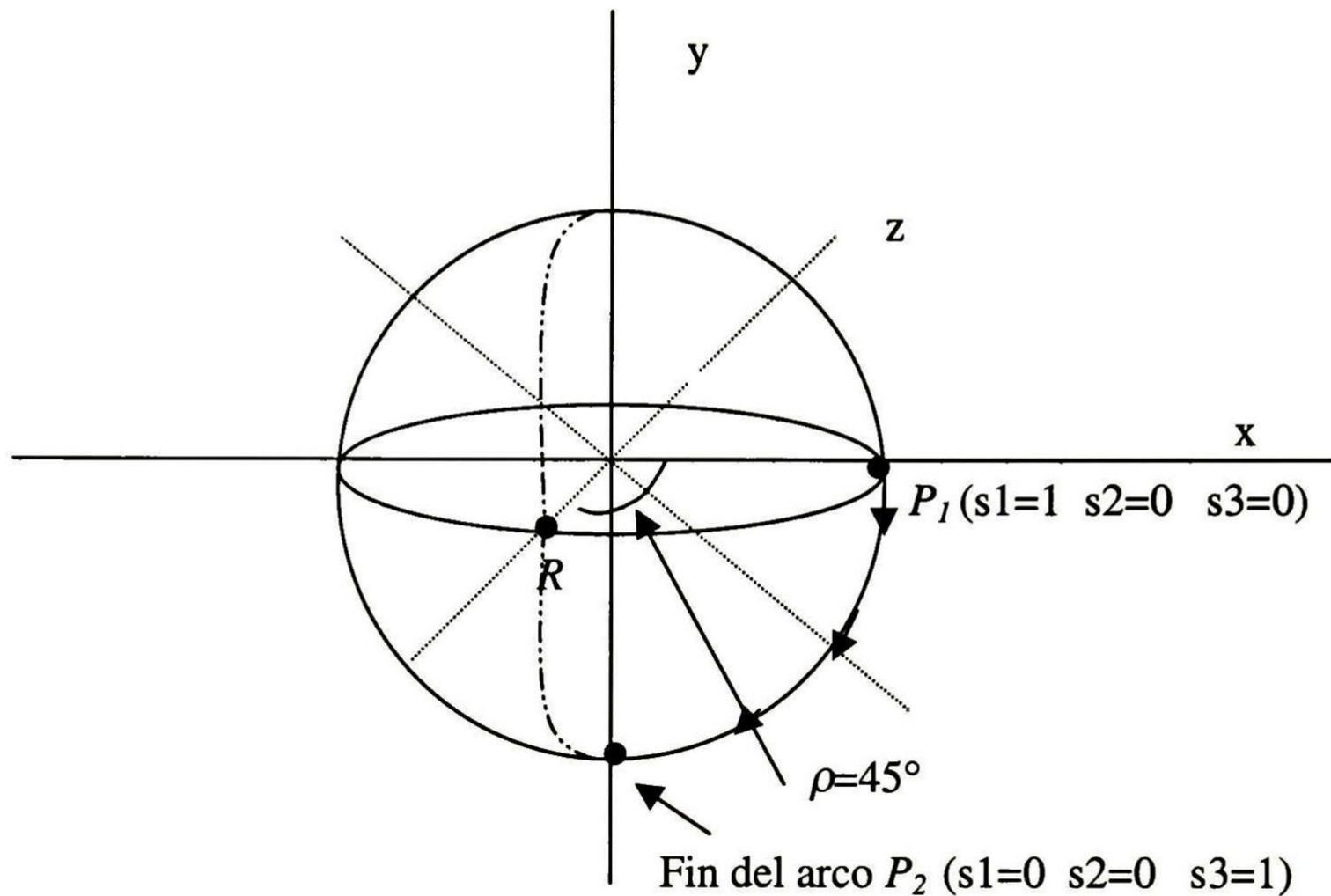


Figura 6.2 Solución del problema 1.

En la figura 6.3 se ilustra el mismo resultado pero el punto P_2 no se aprecia porque queda en la parte posterior de la esfera debido a la rotación que ésta tiene.

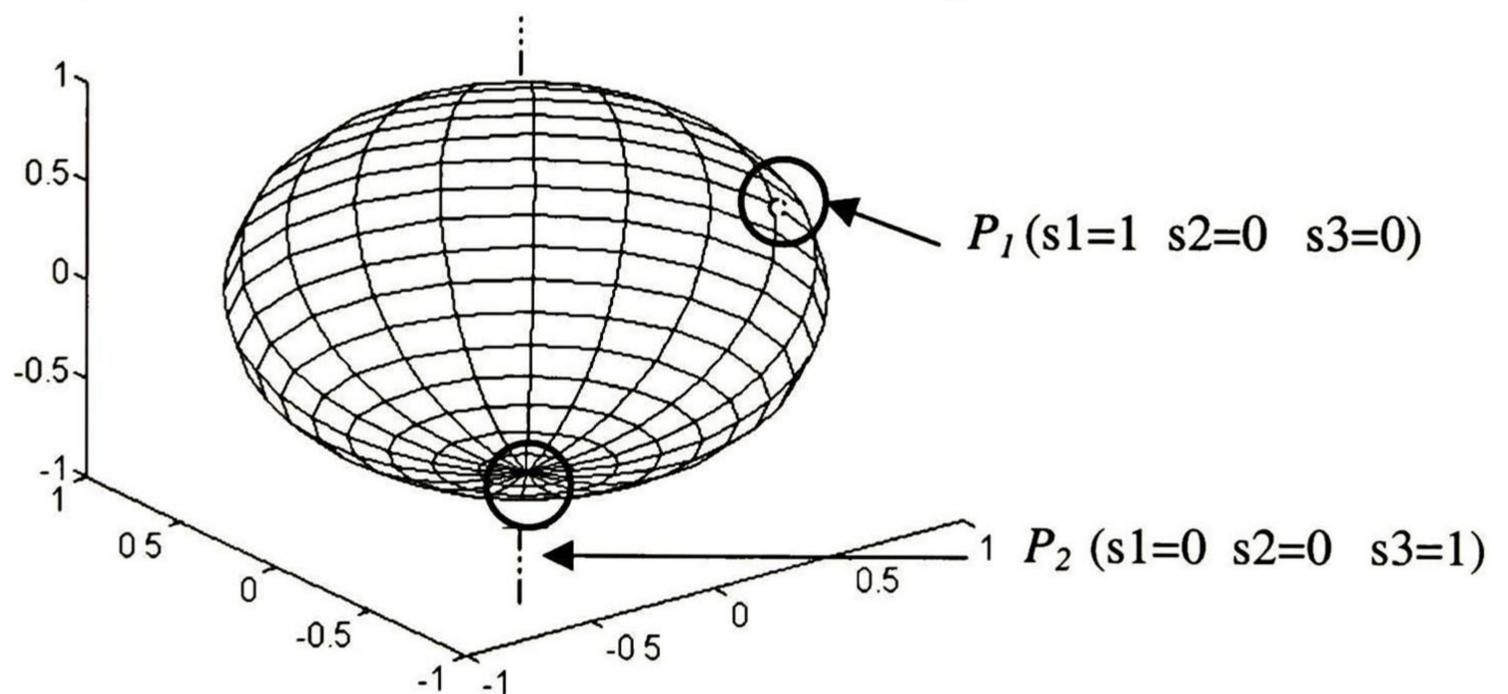


Figura 6.3 Solución del problema 1.

6.3 Datos obtenidos con el software.

Los resultados logrados se reseñan brevemente en los puntos siguientes. Para cada EDP se presentan los datos que el módulo *Poincare* genera, éstos son la esfera del mismo nombre y el valor de las componentes Q (s_1), U (s_2) y V (s_3) del vector de *Stokes* puntualizado en ella. Todos los datos que se proporcionan en el resto del capítulo están graficados como se ilustra en la fig. 6.3.

6.3.1 EDP lineal con $\alpha=0^\circ$ y $\alpha=90^\circ$.

Se asignan al láser 1 de la fig. 6.1 un EDP con $\alpha=0^\circ$, al láser 2 un EDP con $\alpha=90^\circ$ y a *Const* el valor 1 para inyectar luz a la fibra de la fuente conectada a *T* del bloque *Select*, se tiene entonces a la entrada del medio de transmisión lo que se muestra en la figura 6.4.

STOKES parameters: $s_1 = 1.0000$ $s_2 = 0.0000$ $s_3 = 0.0000$

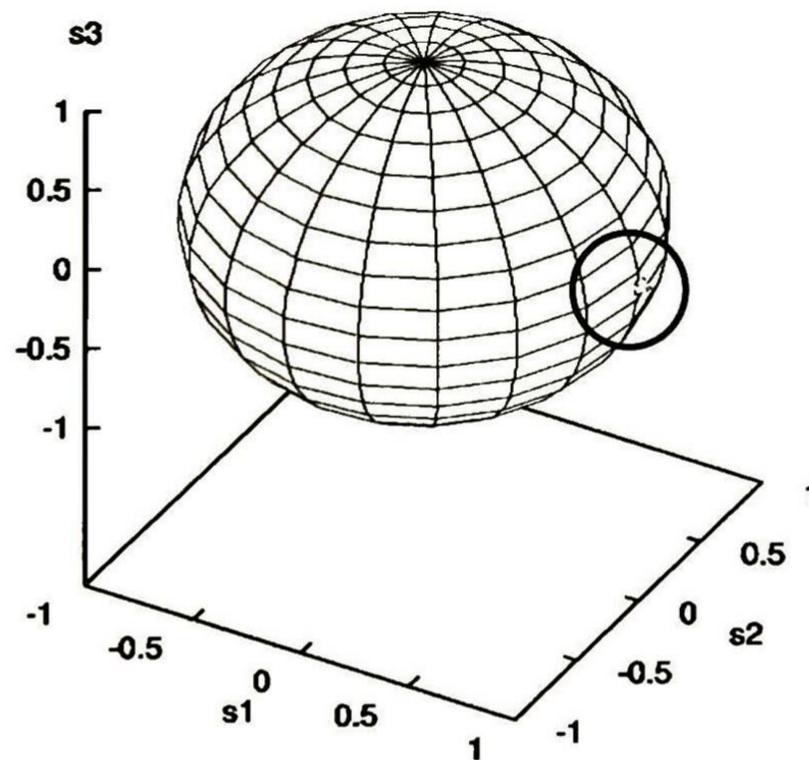


Figura 6.4 Gráfica del EDP horizontal

Al simular el sistema se produce en la luz, que se propagó en el medio, el EDP de la fig. 6.5.

STOKES parameters: $s1 = 0.6652$ $s2 = 0.0000$ $s3 = 0.7467$

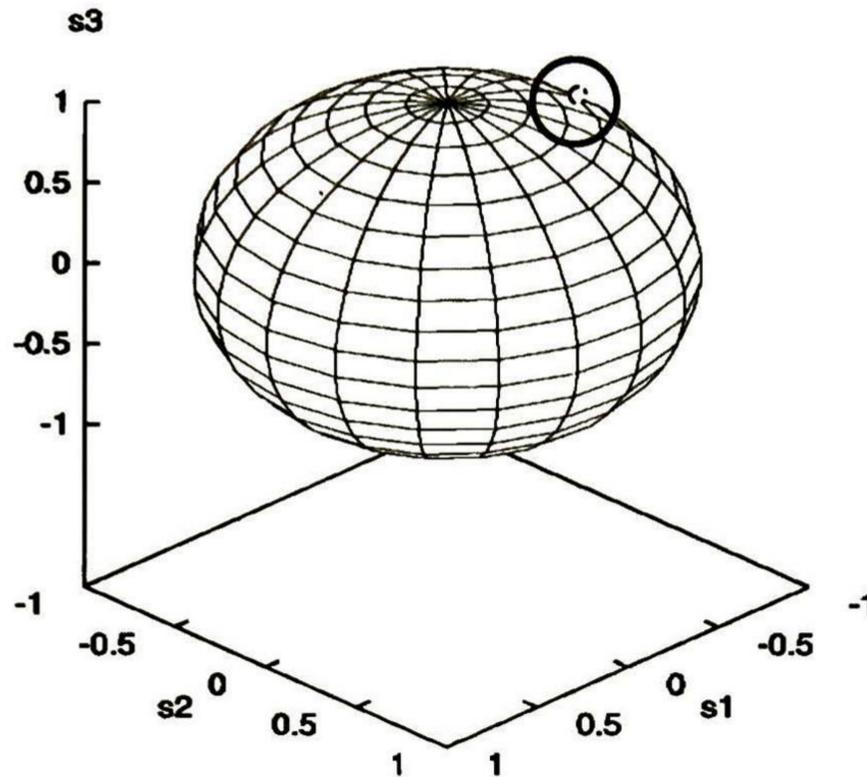


Figura 6.5 Gráfica del EDP a la salida de la fibra óptica.

Como puede notarse en la gráfica anterior la fibra altera el EDP, por lo cual se recurre al programa descrito en el capítulo 5 para determinar la posición del CP que permita recobrar el EDP que aparece en la fig. 6.2. Se resuelve que ρ debe ser de 28° en el retardador de $\lambda/2$ y $\rho=37.5^\circ$ para el primero de $\lambda/4$ y $\rho=70^\circ$ para el segundo, con lo cual se espera tener después del CP el vector mostrado a continuación.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -0.0003 \\ -0.0002 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Al asignar a los elementos *QuarterWavePlate* y *HalfWavePlate* los azimuts mencionados se obtiene el EDP que se muestra en la fig. 6.6. Como puede verse en la simulación se logran los mismos valores que con el programa, lo cual refleja que los retardadores de *BroadNeD* están modelados como elementos ideales por la matriz de *Mueller* en 5.1 y 5.2 (cap. 5).

STOKES parameters: $s_1 = 1.0000$ $s_2 = -0.0003$ $s_3 = -0.0002$

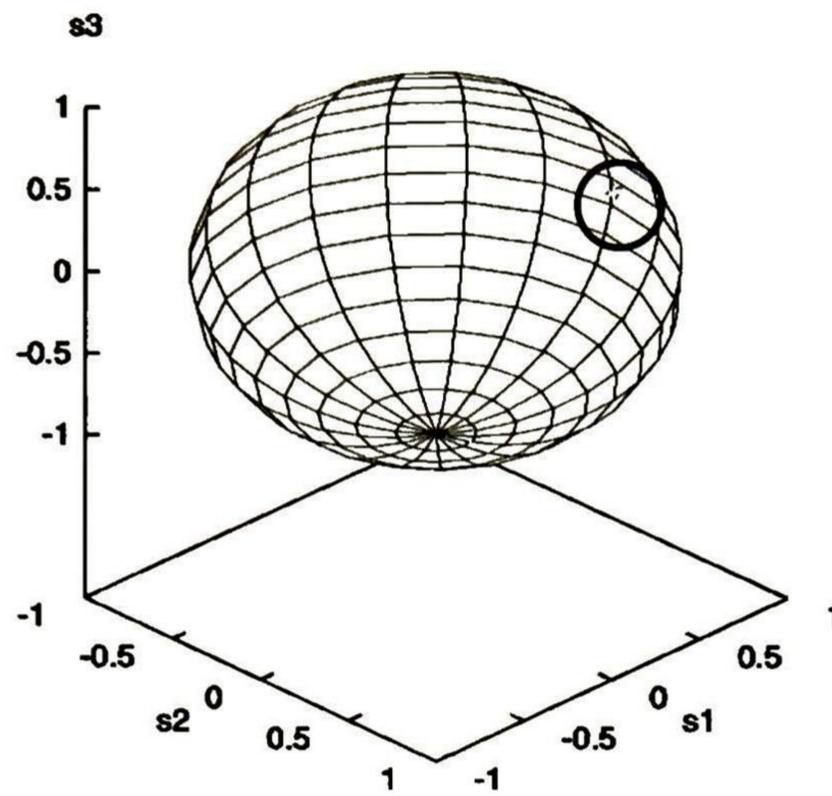


Figura 6.6 EDP después del CP.

Posteriormente se da el valor de cero a *Const* para trabajar con el láser 2 cuyo EDP y vector se exponen a continuación en la figura 6.7.

STOKES parameters: $s_1 = -1.0000$ $s_2 = 0.0000$ $s_3 = 0.0000$

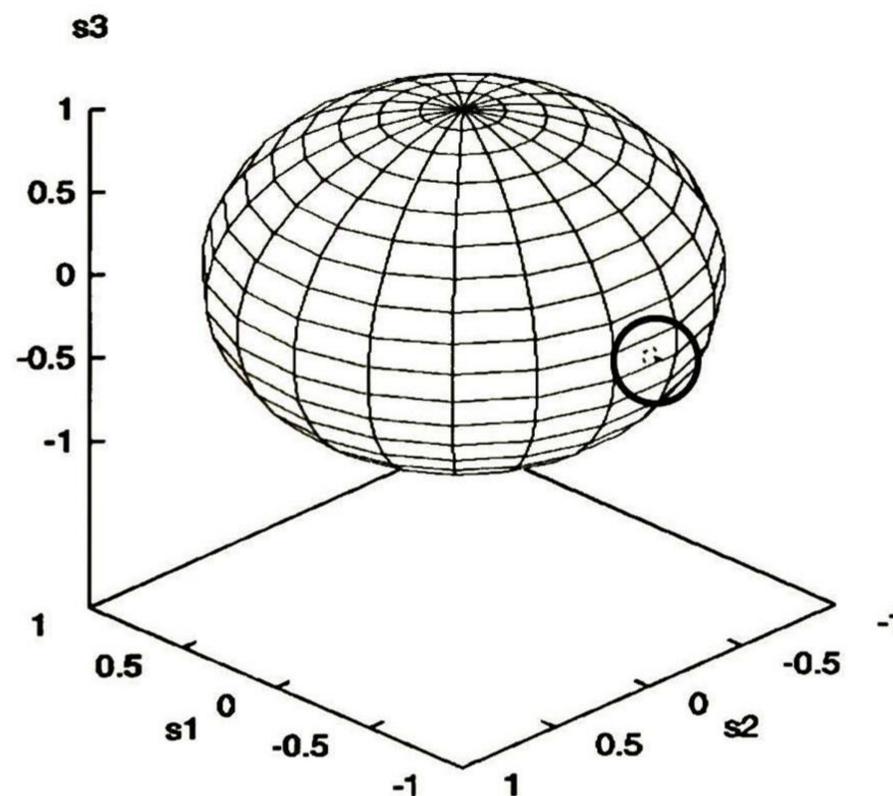


Figura 6.7 EDP en la entrada de la fibra óptica.

Antes de que la nueva señal sea manipulada por el CP se tiene lo siguiente (fig. 6.8).

STOKES parameters: $s_1 = -0.6652$ $s_2 = 0.0000$ $s_3 = -0.7467$

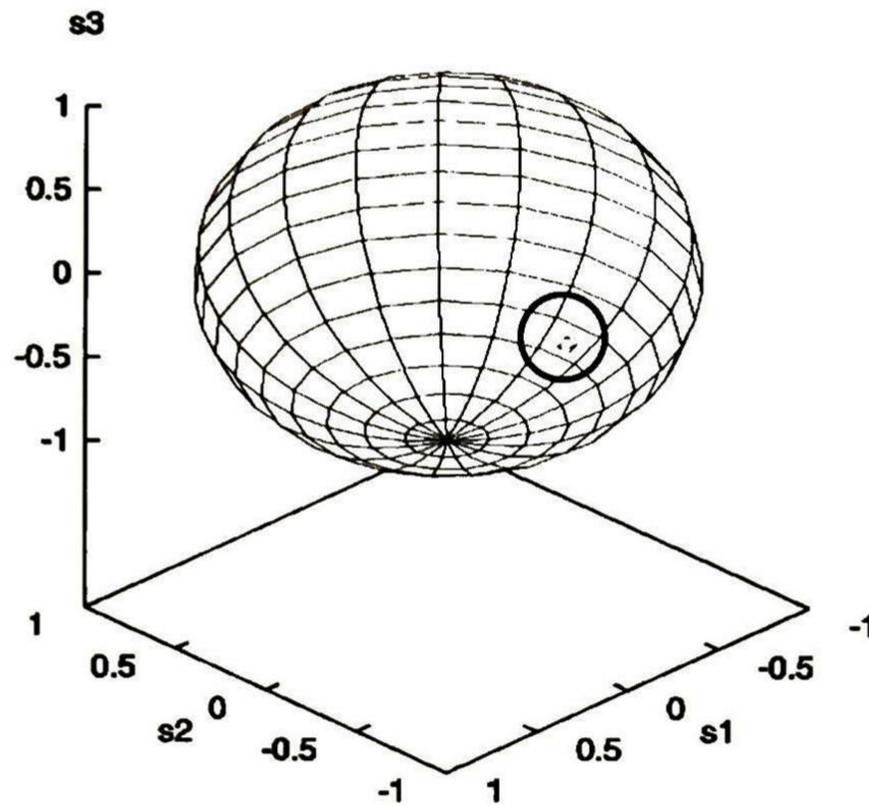


Figura 6.8 EDP a la entrada del CP.

La posición de los elementos del CP no se cambia debido a que se está trabajando con el EDP ortogonal del que se tomó para calcularla. Se obtiene así el EDP de la fig. 6.9, que como puede verse es muy semejante al de la fuente acoplada en ese instante a la fibra.

STOKES parameters: $s_1 = -1.0000$ $s_2 = 0.0003$ $s_3 = 0.0002$

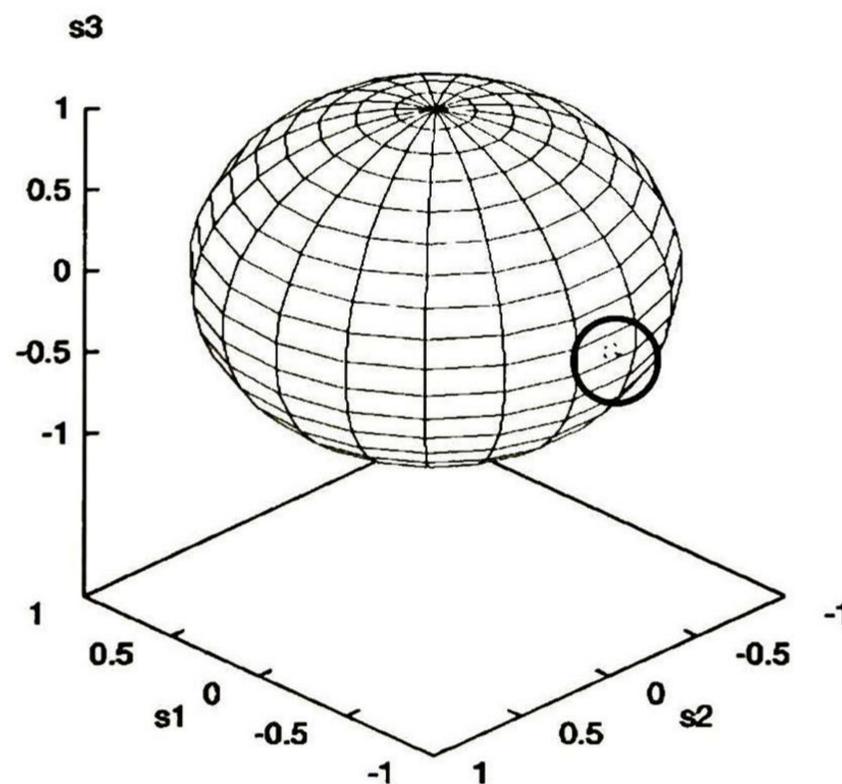


Figura 6.9 EDP a la salida del CP.

6.3.2 EDP lineal con $\alpha=-70^\circ$ y $\alpha=20^\circ$.

Se establece $\alpha=-70^\circ$ para la fuente 1, $\alpha=20^\circ$ para el láser 2 y se realizan los pasos del apartado anterior. Con lo cual se tiene que la primera señal que se transmite es la de la fig. 6.10.

STOKES parameters: $s1 = -0.7660$ $s2 = -0.6428$ $s3 = 0.0000$

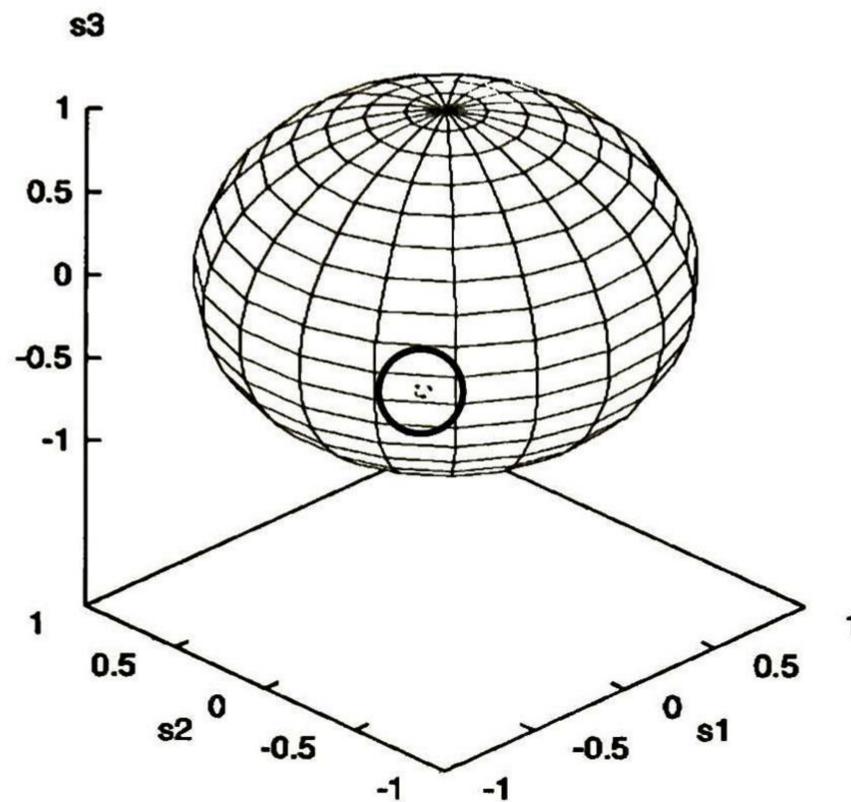


Figura 6.10 Gráfica del EDP en la entrada de la fibra.

Sin embargo en el extremo opuesto de la fibra se presenta el EDP de la fig. 6.11.

STOKES parameters: $s1 = -0.5096$ $s2 = -0.6428$ $s3 = -0.5720$

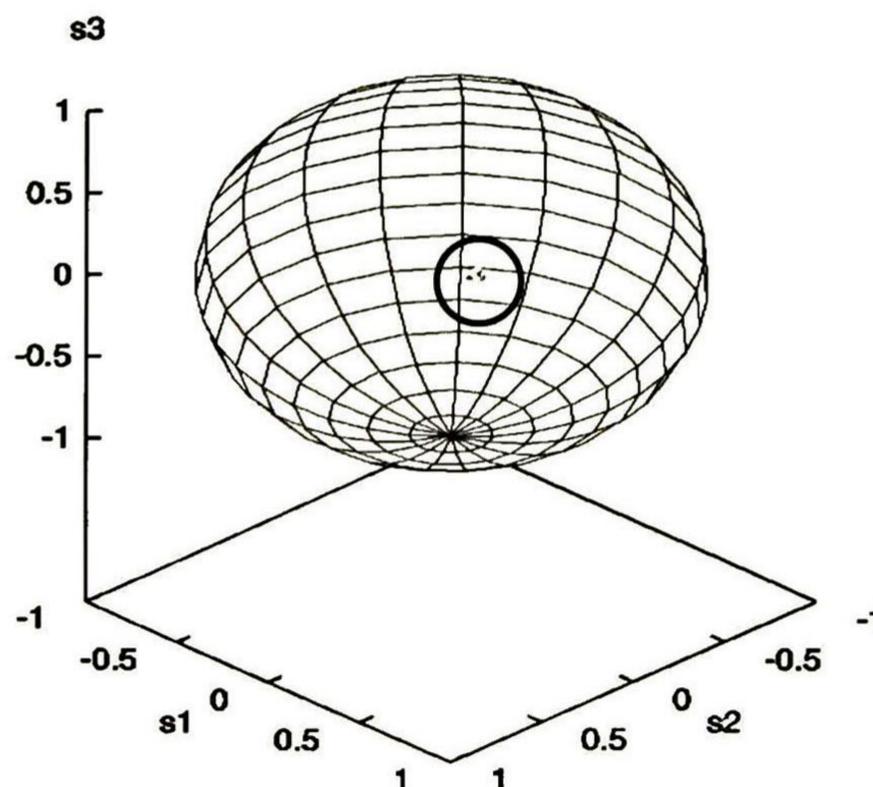


Figura 6.11 EDP en la salida de la fibra.

De acuerdo con el programa sí ρ del retardador de $\lambda/2$ es 15° , $\rho=5^\circ$ en el primero de $\lambda/4$ y $\rho=3.5^\circ$ para el segundo se lograría convertir el resultado en la figura anterior en el que se expone en el vector a continuación:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.7662 \\ -0.6427 \\ 0.0001 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Al especificar en los elementos del CP los ángulos mencionados se obtiene el EDP de la fig. 6.12 en donde se observa que se recupera perfectamente el EDP inicial que fue expuesto en la fig. 6.10.

STOKES parameters: s1 = -0.7661 s2 = -0.6427 s3 = 0.0000

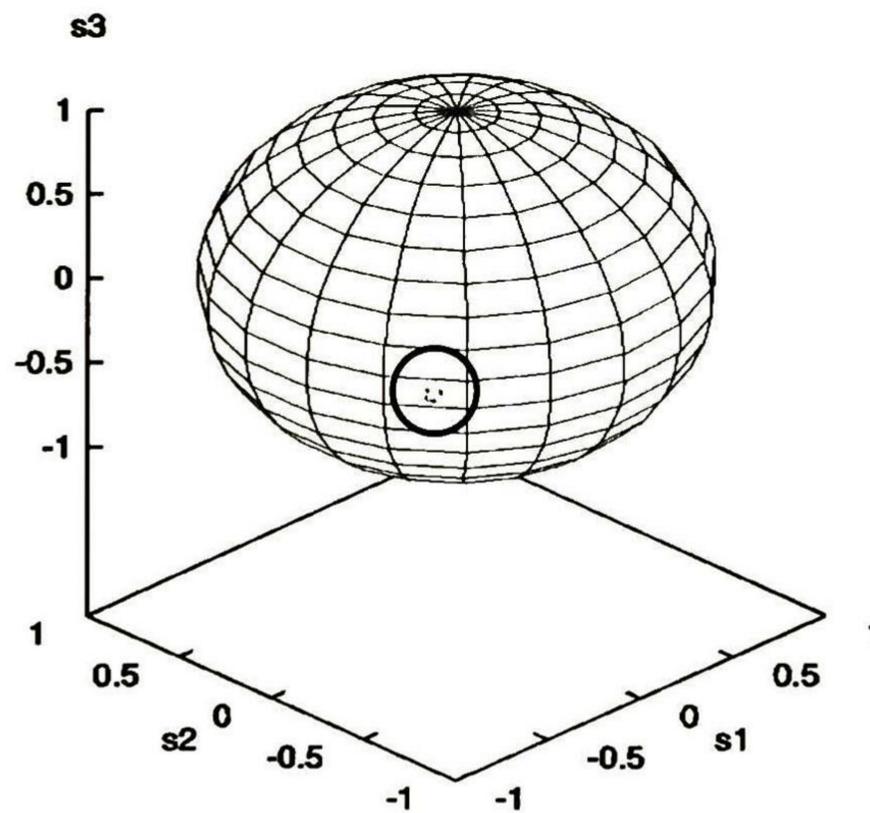


Figura 6.12 EDP después del CP.

Se presentan ahora en las figuras 6.13, 6.14 y 6.15 los estados de polarización que se tienen en el sistema al cambiar el valor de *Const* a cero para trabajar con el EDP ortogonal al de la fig. 6.10.

STOKES parameters: $s_1 = 0.7660$ $s_2 = 0.6428$ $s_3 = 0.0000$

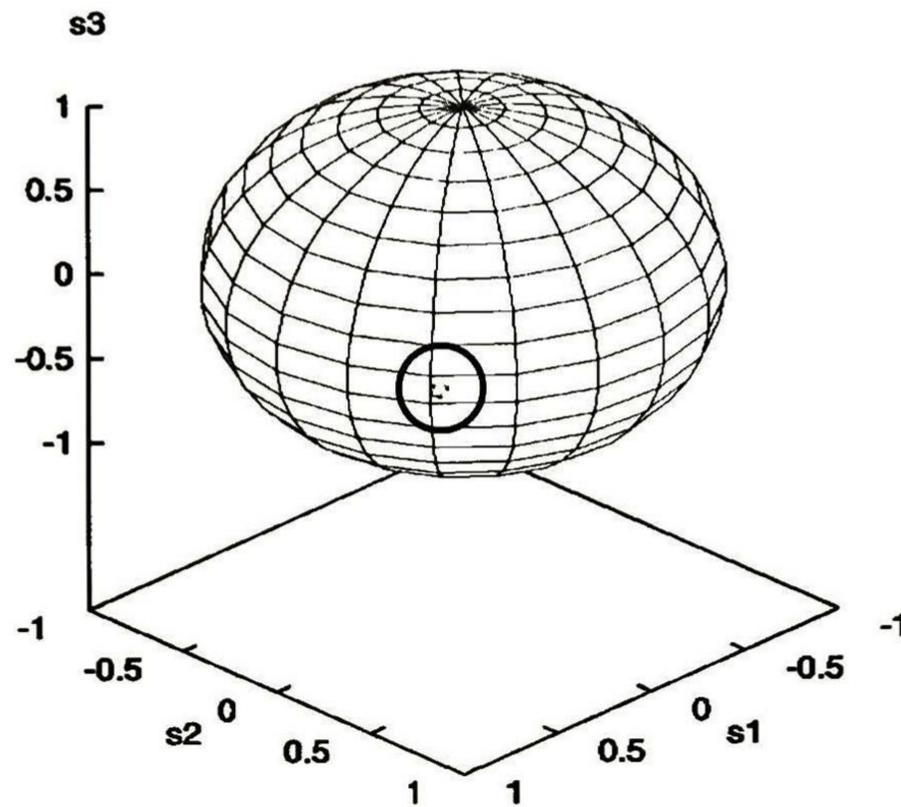


Figura 6.13 EDP de la fuente 2.

STOKES parameters: $s_1 = 0.5096$ $s_2 = 0.6428$ $s_3 = 0.5720$

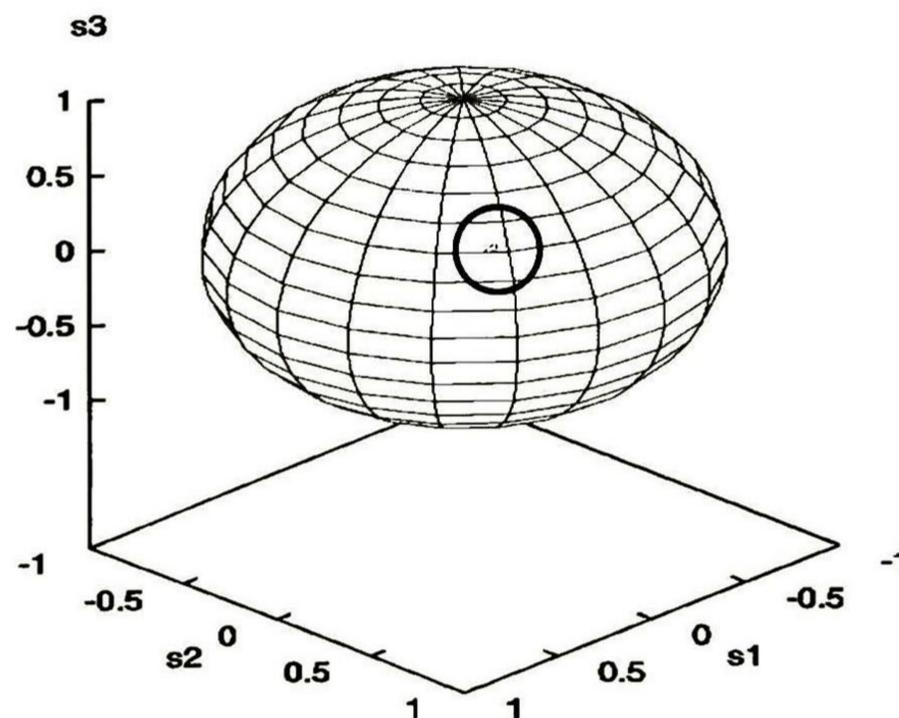


Figura 6.14 EDP antes del CP.

STOKES parameters: $s_1 = 0.7661$ $s_2 = 0.6427$ $s_3 = -0.0000$

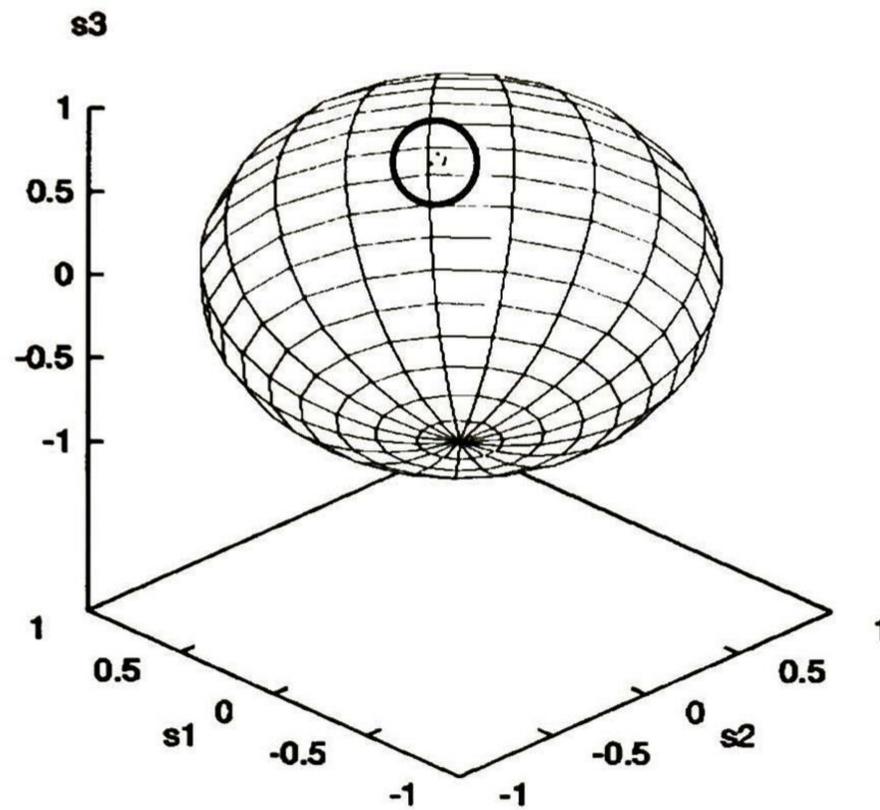


Figura 6.15 EDP después del CP.

6.3.3 EDP lineal con $\alpha = -40^\circ$.

En las figuras 6.16 y 6.17 se muestran el EDP del láser seleccionado mediante *Const* y el presente a la salida de la fibra.

STOKES parameters: $s_1 = 0.1736$ $s_2 = -0.9848$ $s_3 = 0.0000$

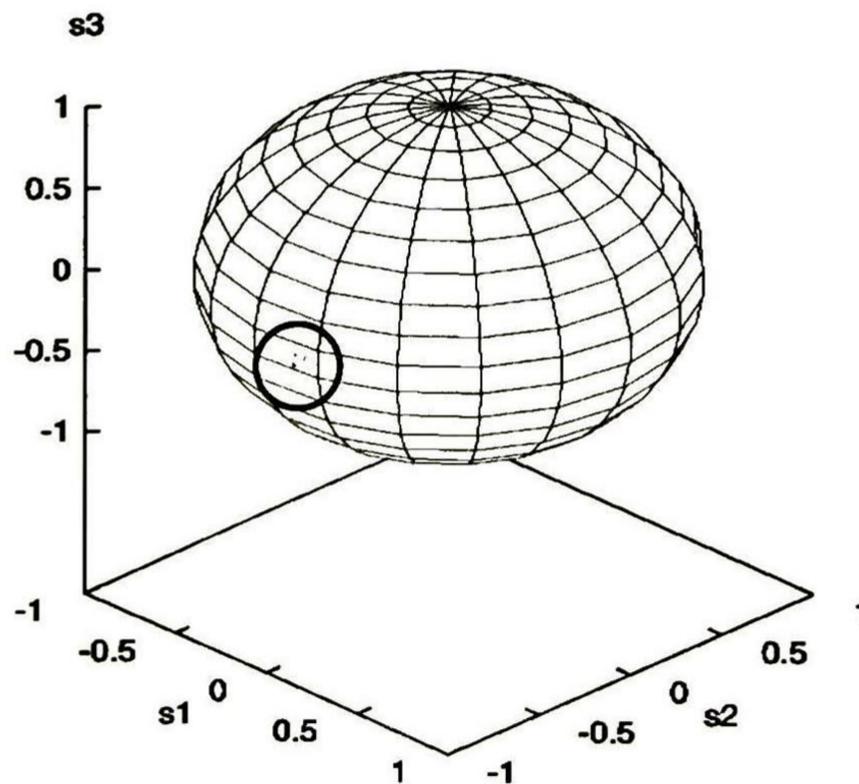


Figura 6.16 EDP del láser 1.

STOKES parameters: $s_1 = 0.1155$ $s_2 = -0.9848$ $s_3 = 0.1297$

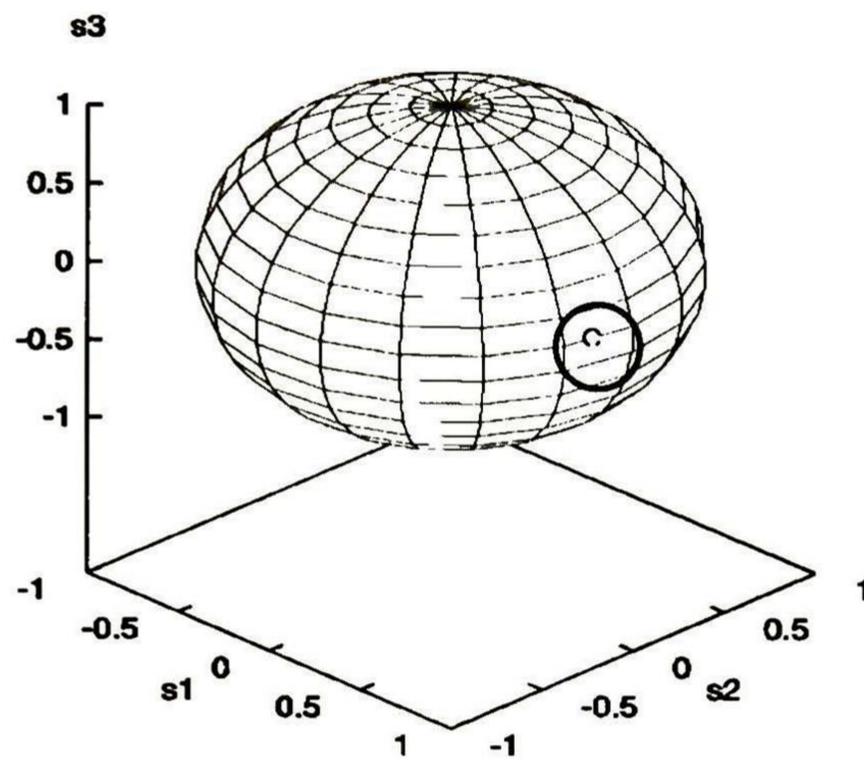


Figura 6.17 Gráfica del EDP antes del CP.

Con los datos de las dos figuras anteriores el programa determina que sí $\rho=12^\circ$ en el elemento que retarda $\lambda/2$ y $\rho=0^\circ$ en los dos de $\lambda/4$ se obtendría el vector en 6.3.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.1737 \\ -0.9845 \\ 0.0010 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

El vector que se obtiene en la simulación es el que forma parte de la fig. 6.18.

STOKES parameters: $s_1 = 0.1736$ $s_2 = -0.9848$ $s_3 = 0.0009$

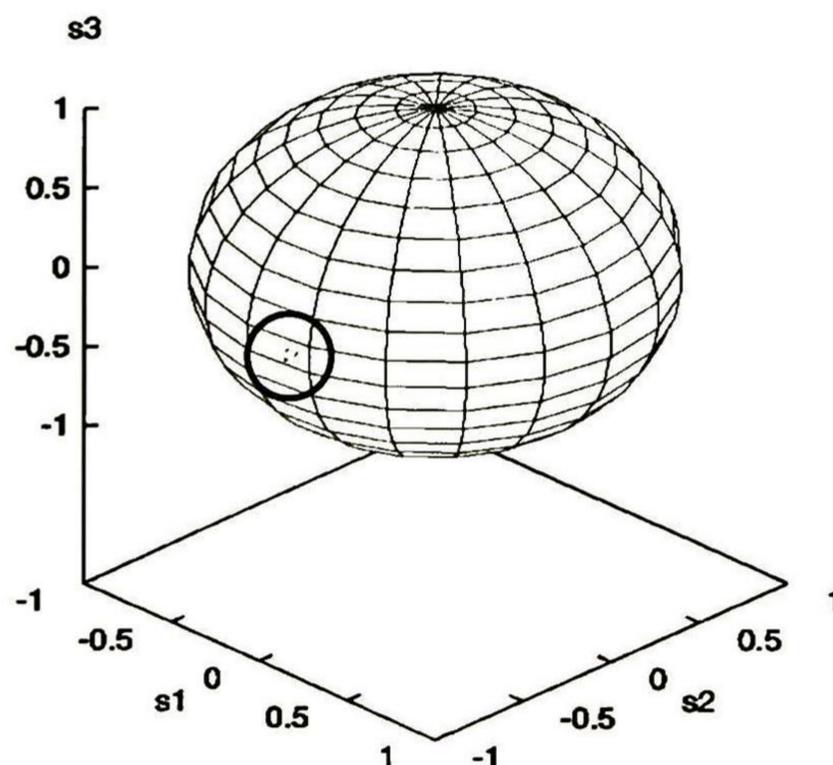


Figura 6.18 EDP en la salida del CP.

6.3.4 EDP lineal con $\alpha = -80^\circ$.

En las figuras 6.19, 6.20 y 6.21 se presentan los resultados que se obtuvieron para este EDP al colocar los retardadores de la fig. 6.1 con ángulos de 23.5° , 25° y 93.5° respectivamente.

STOKES parameters: $s_1 = -0.9397$ $s_2 = -0.3420$ $s_3 = 0.0000$

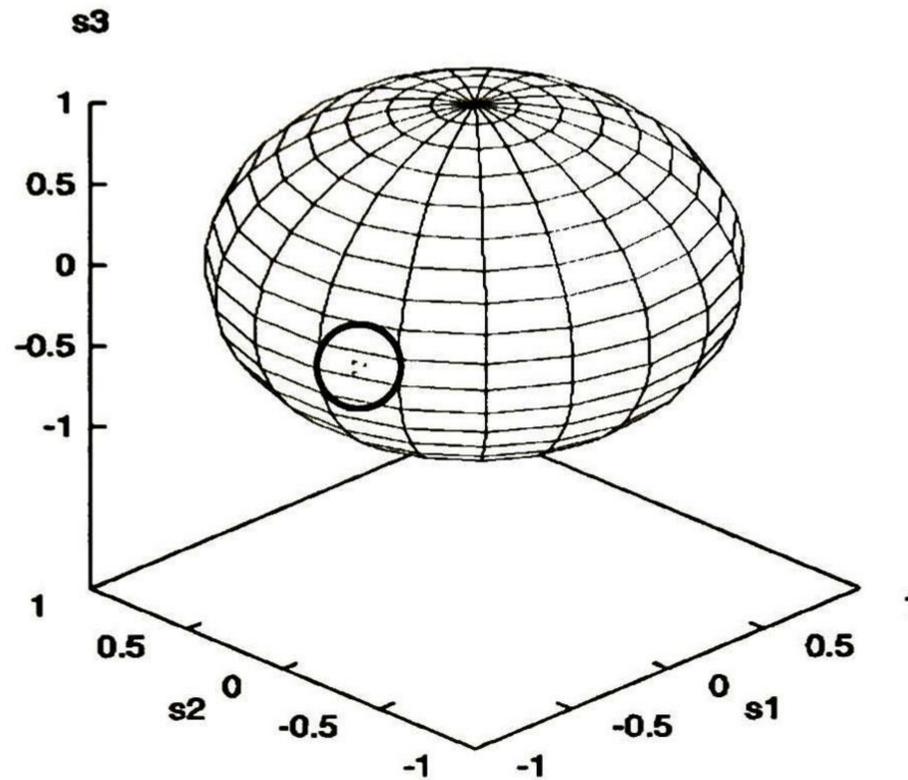


Figura 6.19 EDP que se acopla a la fibra óptica.

STOKES parameters: $s_1 = -0.6251$ $s_2 = -0.3420$ $s_3 = -0.7016$

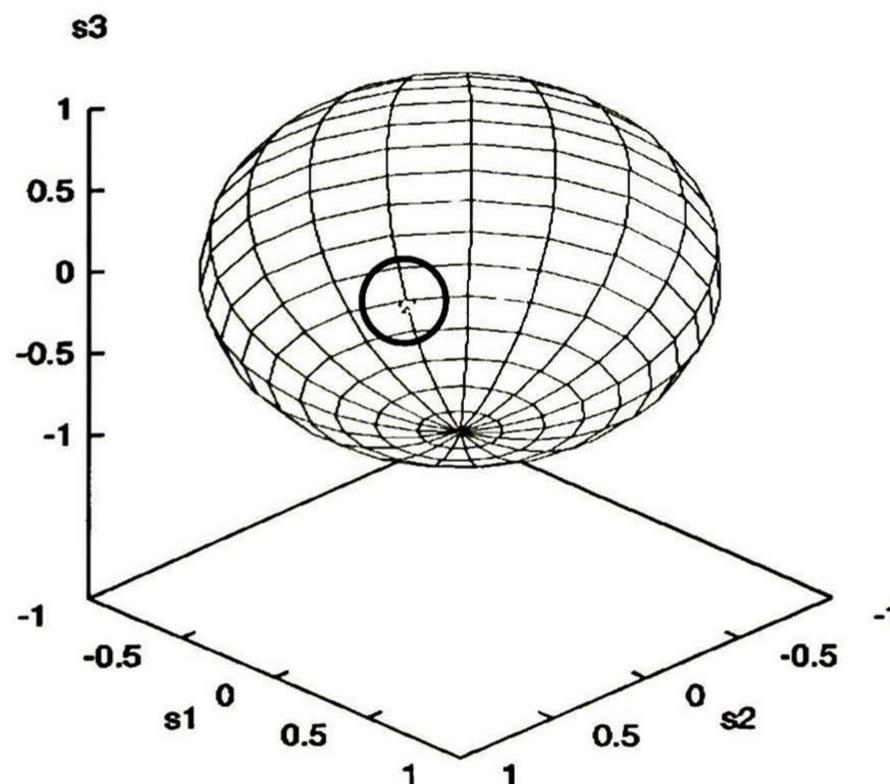


Figura 6.20 EDP que se obtiene en la salida de la fibra.

De acuerdo con el programa el vector después del CP debería ser:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.9400 \\ -0.3410 \\ -0.0008 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Mismo que se ratifica con la simulación cuyo resultado se pone en la figura a continuación.

STOKES parameters: s1 = -0.9401 s2 = -0.3410 s3 = 0.0008

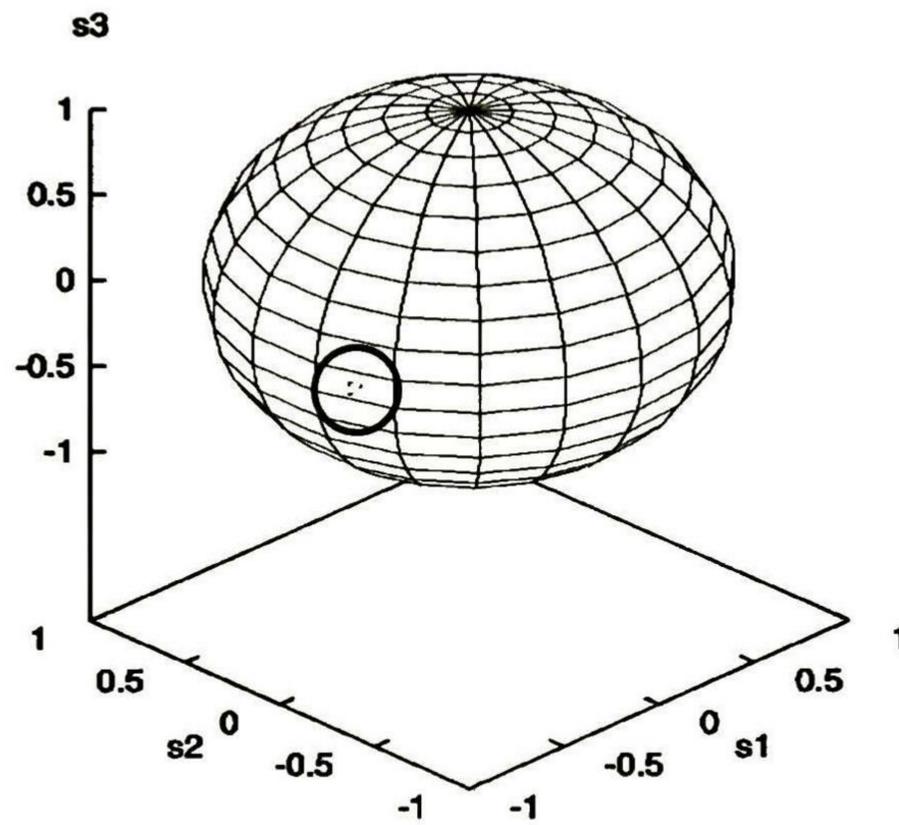


Figura 6.21 EDP después del CP.

Capítulo 7

Análisis de los resultados y conclusiones

En el presente capítulo se expone un análisis y comparación de los resultados así como las observaciones, conclusiones y sugerencias para utilizar el trabajo que se muestra en este documento.

7.1 Análisis de los resultados.

Como puede notarse los datos que se obtuvieron al emplear un CP en el sistema físico y que se presentaron en el capítulo cinco no son exactamente iguales a los que generaba el programa, o a los estados de polarización ideales. Lo anterior se debe a varias causas las cuales se exponen a continuación:

- Para determinar los azimuts de los retardadores (ρ 's) el programa hace el cálculo utilizando las matrices ideales de los elementos (5.1 y 5.2), mientras que los dispositivos fabricados por compañías o los elaborados con la fibra misma son, aunque buena, una aproximación de su modelo correspondiente.
- El incremento en el valor de los ángulos que se calculan en el programa para los retardadores es de 0.5° , lo cual genera por ejemplo inclinaciones de 78.5° , 10.5° , ángulos que resultan difíciles de conseguir y aún más delicado sería asegurar que siempre se alinean los elementos del CP con tal precisión.
- Aunque todas las mediciones se trataron de realizar bajo las mismas condiciones de iluminación, de temperatura, de colocación de elementos como el analizador, el retardador, el diodo detector, etc., así como con un mismo tránsito de personas en el laboratorio, etc. no se puede garantizar, sin embargo que en todo el tiempo que tomó registrar las lecturas los factores mencionados hayan sido siempre iguales.
- Recordar también el margen que hay en el radio $R(m,N)$, cap. 2, además de una posible imprecisión al tratar de enrollar la fibra con el radio exacto.

Considerando todo lo anterior se puede decir que los resultados obtenidos con el CP son, sí no excelentes sí muy buenos. Esto debido en parte a la selección del procedimiento de medición adecuado para formar los vectores de *Stokes*.

7.2 Comparación de resultados.

Los resultados logrados en simulación (cap. 6) superan a los expuestos en el cap. 5, no obstante los datos que se presentan en este capítulo son muy semejantes a los

producidos con *BroadNeD*. Con este software se podrían obtener estados de polarización aún más próximos a los ideales al variar el paso de 0.5° a 0.01° ó 0.001° en el código que determina la posición de los elementos del CP, que en este caso son dispositivos externos a la fibra, esta mejor aproximación sería debido a que los módulos que representan a los retardadores de $\lambda/4$ y $\lambda/2$ se comportan exactamente igual que las matrices de *Mueller* [5] de estos elementos. Mientras, en la práctica se requiere de mucha más precisión al implementar y colocar al CP para tener una mejora mínima en los datos obtenidos.

7.3 Observaciones.

- Es importante conocer y manejar de forma correcta las piezas que conforman el sistema: láser, objetivo de microscopio, polarizadores, retardadores, medidor, etc. ya que al conocerlos mejor se aprende a utilizarlos adecuadamente, con lo que se logran resultados cada vez mejores. Por ejemplo, al formar el vector de *Stokes* del EDP con los arreglos vistos en el capítulo tres (figs. 3.3 y 3.4) el método a seguir está definido en su totalidad, pero el acomodo de las piezas depende de quien realice las mediciones. Por ello, las mediciones que se ponen en este documento y que son una mínima parte de las que se realizaron, se obtuvieron después de muchas otras que se hicieron; primero, para cada elemento; después, para la selección del procedimiento apropiado con el fin de establecer el vector de *Stokes* del EDP y por último, para el sistema completo.
- El método para formar el vector de *Stokes* es fundamental para observar qué EDP se tiene en realidad considerando de antemano que se conoce el que se desea.
- Es interesante también la elaboración de retardadores con la fibra óptica, a través de un proceso relativamente sencillo [2] con el que se forman elementos de fácil operación y de muy bajo costo que pueden sustituir a componentes voluminosos y delicados que de otra manera se tendrían que adquirir con alto costo.
- El uso de un software de simulación especial para comunicaciones por fibra óptica enriquece el estudio realizado para el control del EDP y proporciona una fuente actual de comparación entre los datos que por simulación se consiguen en él y los que se obtienen en sistemas reales.

7.4 Conclusiones

Los resultados que se lograron en el sistema de la figura 2.10, expuestos en el capítulo 5, se consiguieron por:

- la construcción adecuada del CP (fig. 5.1) cuyos elementos están formados de acuerdo con la ecuación 2.10.
- la selección correcta del procedimiento para determinar el EDP de la luz, donde el método escogido nos permite corroborar que el CP restablece el EDP.

De acuerdo con lo anterior se puede concluir que se cubrió satisfactoriamente el objetivo de esta tesis.

7.5 Trabajo futuro.

Aunque el estudio del EDP es de interés en otras áreas [3], en telecomunicaciones la importancia de recuperar un EDP surge como se mencionó en el capítulo uno con los enlaces coherentes [13] a través de fibras ópticas convencionales en donde las aplicaciones directas de un CP como el que se construyó y probó en este trabajo, es utilizarlo como parte del receptor, no importando el tipo de modulación que se emplee, para controlar esta característica de la luz antes de que ésta sea mezclada con la señal del oscilador local, o usarlo en la investigación y prueba de modulaciones PolSK (binarias, octales, etc.) o DPolSK [9,10,13].

Anexo A

“Polarización en fibras ópticas monomodo”, artículo publicado en la 4^a Conferencia de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, México D. F. (1998).

Polarización en fibras ópticas monomodo

Margarita Franco García, CINVESTAV-IPN unidad Guadalajara, Prol. Av. López Mateos Sur 590 C. P. 45090, Tel. (3) 684-15-80, Fax. (3) 684-17-08, e-mail: mago@gdl.cinvestav.mx

Arturo Veloz Guerrero, CINVESTAV-IPN unidad Guadalajara, Prol. Av. López Mateos Sur 590 C. P. 45090, Tel. (3) 684-15-80, Fax. (3) 684-17-08, e-mail: arturov@ieee.org

Gabriela María Ruiz Soto, Cerro de la Leona No. 2745, Fracc. Mirador Residencial, Monterrey, N. L. 64910, Tel. (8) 357-88-75.

Palabras clave: fibras ópticas, polarización, birrefringencia, polarizadores, retardadores.

Resumen

En el presente trabajo se busca controlar el estado de polarización (EDP) de la luz en la salida de una fibra óptica monomodo común, (no especialmente fabricada) para que a pesar de los cambios que éste sufra se pueda obtener la misma polarización fija, o bien, un alto porcentaje del EDP que se acopló a la entrada de dicha fibra.

I. Introducción

En los sistemas ópticos coherentes el receptor es sensitivo al estado de polarización de la luz que recibe, por lo que dicha polarización debe controlarse antes de su mezcla con el oscilador local láser. Otras aplicaciones importantes donde se utiliza el EDP de la luz en las fibras ópticas es cuando se realizan modulaciones en PolSK (Polarization Shift Keying) o

DPolSK (Differential Polarization Shift Keying) en las que se aprovecha la naturaleza vectorial del campo óptico. Lo anteriormente expresado motiva al estudio de la conservación o recuperación de polarizaciones para uso en sistemas ópticos de comunicaciones.

En las fibras monomodo convencionales el estado de polarización de la luz que es acoplada a éstas sufre cambios de estado (algunas veces sólo rotaciones); sin embargo, las fibras preservan el grado de polarización [1] lo cual ha permitido desarrollar diferentes técnicas para contrarrestar este efecto de modificación que producen a los EDP [2], estas técnicas se tratarán en la sección II. La polarización de la señal de entrada y salida de la fibra así como el sistema de control de polarización serán representados con vectores de Stokes y matrices de Mueller respectivamente, los cuales serán tratados brevemente en la sección III. El sistema experimental y sus resultados se verán en la sección IV.

II. Compensadores de polarización

Cuando la luz con determinado EDP es acoplada a un extremo de una fibra óptica monomodo, en el otro extremo (salida) se observa un EDP generalmente elíptico, esto se produce en respuesta a cambios en la temperatura, presión, microdefectos en la geometría y material de la fibra misma, entre otros; por lo cual han surgido varias técnicas para la compensación de polarización como: (1) los controladores de polarización, (2) fibras especiales birrefringentes (PMF *polarization maintaining fibers*), y (3) diversidad de polarización (*polarization diversity*).

Entre los sistemas del primer tipo se encuentran: discos rotatorios, rotadores Faraday, cristales líquidos, *squeezers*, entre otros. En este trabajo se utilizaron discos rotatorios [3] que permiten inducir birrefringencia cuando se enrolla la fibra con cierto radio y se construyen así retardadores de cuarto, de media, de octavo de longitud de onda con los que se puede transformar un EDP elíptico cualquiera en uno lineal y viceversa, lo cual permite convertir el estado de polarización elíptico que produce la fibra en el que era inicialmente (lineal, en este caso). El radio con el que se debe enrollar la fibra se obtiene de la expresión:

$$R(m, N) = \frac{2\pi ar^2}{\lambda} Nm \quad (1)$$

N= número de vueltas

a=0.133

r= radio de la fibra

m= 2,4,8; para un medio, cuarto y octavo de λ respectivamente

λ = longitud de onda

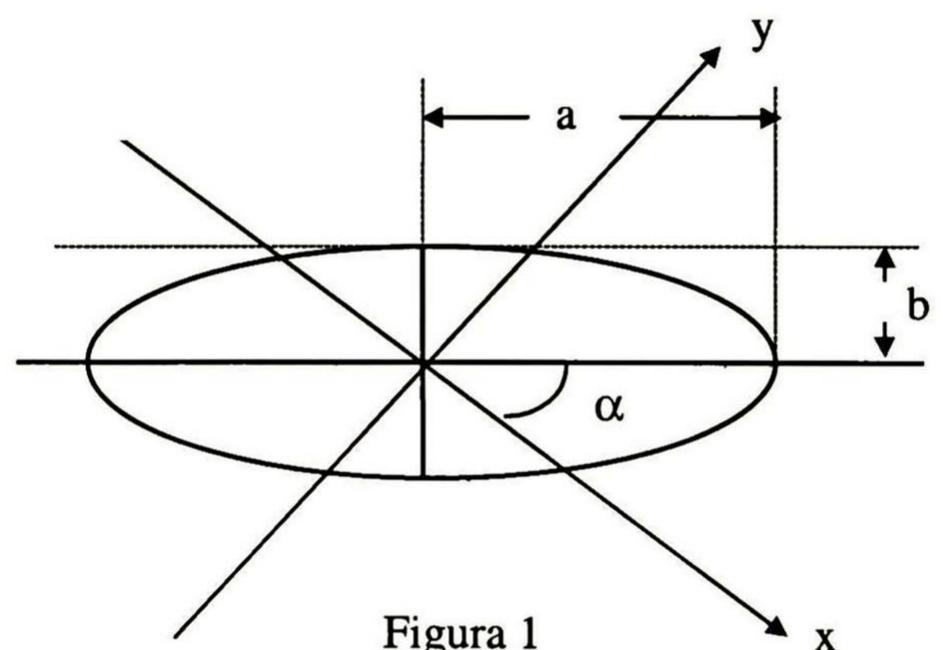
Se empleó este método basado en discos rotatorios porque el radio R obtenido para la fibra utilizada genera muy poca pérdida de intensidad sin daños mecánicos, siendo este además el controlador de polarización más comúnmente usado [4].

III. Vector de Stokes y Matrices de Mueller

Los EDP de la luz y los dispositivos ópticos utilizados en este trabajo tienen un vector de Stokes o una matriz de Mueller ya definidos [1] y que están dados de la siguiente manera:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\omega)\cos(2\alpha) \\ \cos(2\omega)\sen(2\alpha) \\ \sen(2\omega) \end{bmatrix} \quad (2)$$

La polarización de la luz cuyo vector de Stokes es (2) se caracteriza por su azimut (α), su elipticidad ($\tan|\omega|=b/a$), ver Fig. 1, y su sentido (derecho, izquierdo).



Las matrices de Mueller para un polarizador lineal y retardador lineal son:

Para un polarizador lineal se tiene:

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde:

θ = azimut (ángulo del polarizador con respecto al eje x determinado).

Para un retardador lineal se tiene que su matriz de Mueller RT está dada por:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_4 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & S_4 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & -S_2 \sin(\delta) \\ 0 & S_4 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & -C_4 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) & C_2 \sin(\delta) \\ 0 & S_2 \sin(\delta) & -C_2 \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_2 = \cos(2\rho), \quad C_4 = \cos(4\rho), \quad S_2 = \sin(2\rho), \\ S_4 = \sin(4\rho)$$

donde:

δ = retardancia, ρ = azimut.

En una fibra óptica la evolución de un estado de polarización de la luz puede ser representada en el espacio de Stokes como una rotación aleatoria continua de la esfera de Poincaré[5], razón que podría dar lugar a utilizar una matriz de Mueller como la de un retardador [6] para modelar ésta, por otro lado también se puede emplear la matriz de Jones para una fibra (*fiber Jones matrix*) [5]. Sin embargo, la matriz (ya sea de Mueller o de Jones) que describe una fibra óptica es particular a ella ya que, la matriz de otro trozo de fibra de la misma longitud, tipo, marca, puede ser diferente

debido a las irregularidades de la forma circular del núcleo o a los microdefectos del material de construcción que pueden variar de un trozo a otro. Por esto último para el controlador de polarización se consideran los estados de polarización resultantes a la salida de una fibra para transformarlos a los iniciales y no en la evolución aleatoria y representación de éstos en ella.

IV. Experimento

En este trabajo se empleó un láser de Helio Neón (HeNe) a 632.8nm con una potencia mínima de 1mW, una fibra monomodo de 20 metros con longitud de onda de corte a 580 ± 30 nm enrollada en un carrete de 31.3 cm de diámetro, se usó además un polarizador lineal para asegurar el estado de polarización del láser y un objetivo de microscopio para acoplar la luz de éste a la fibra. Manteniendo un estado lineal con azimut 0° , 25° , 45° ó cualquier otro a la entrada se observaron cambios en el estado de polarización; en la Fig. 2 se muestra la rotación que la fibra provocó a una polarización lineal con azimut de 45°

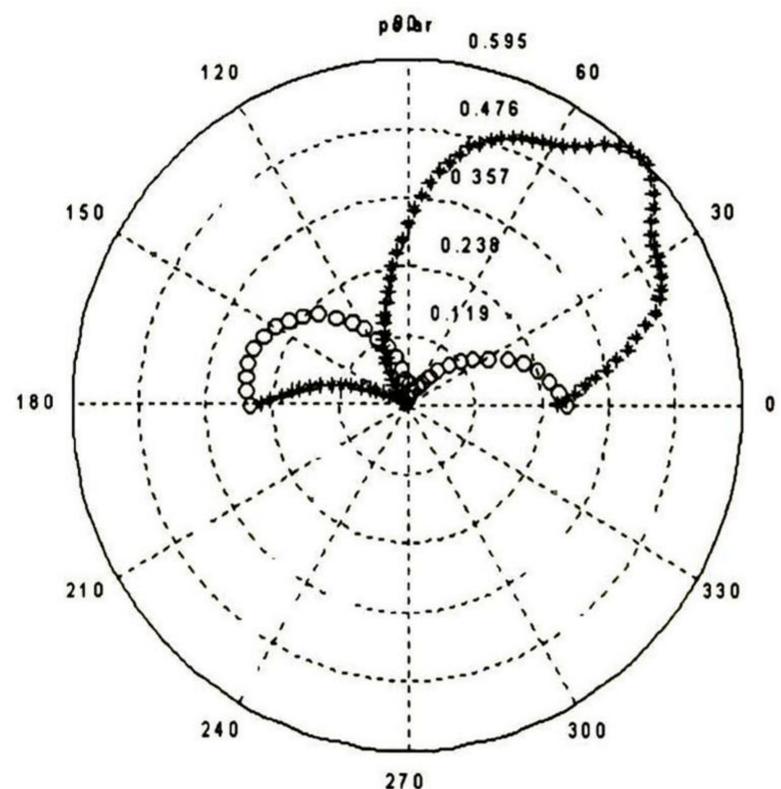


Figura 2

El estado resultante que está graficado con el caracter 'o' es el que al añadir el sistema de control se pudo transformar en el que se presenta a la entrada (graficado con '*') utilizando para ello un arreglo de dos retardadores de cuarto de longitud de onda ($\lambda/4$) y uno de media longitud de onda ($\lambda/2$), por lo que δ en la matriz antes mencionada (4) sería 90° y 180° respectivamente; aunque dependiendo del EDP final se pueden emplear sólo dos retardadores de cuarto de onda; éstos retardadores se elaboraron al enrollar la fibra óptica como se muestra en la fig. 3

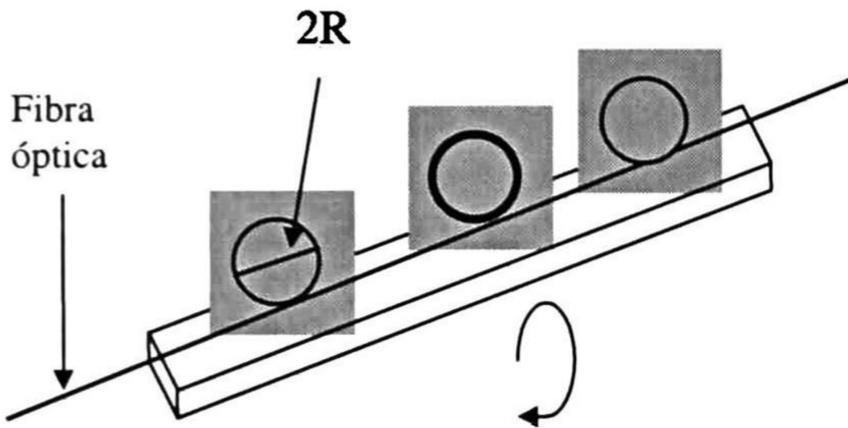


Figura 3

El radio R que se obtuvo fue de 2.06cm con una vuelta para hacer los retardadores de cuarto de onda y con dos vueltas para el de media onda, la magnitud de este radio puede estar entre 1.997cm y 2.12cm esto debido a la tolerancia de $\pm 2\mu\text{m}$ que proporciona el fabricante de la fibra en cuanto al radio de la misma. Este radio (R) nos permite no tener pérdidas por curvatura ya que de acuerdo con [7] el radio crítico de curvatura para una fibra monomodo está dado por:

$$R_{cs} \equiv \frac{20\lambda}{(n_1 - n_2)^2} \left(2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad (5)$$

donde λ es la longitud de onda, λ_c es la longitud de onda de corte, n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y revestimiento respectivamente, los cuales son 1.4616 y 1.4571 en la fibra que se utilizó.

Para medir y determinar el vector de Stokes a la entrada y a la salida de la fibra óptica monomodo se siguió el método descrito en [8] empleando un analizador y un retardador de $\lambda/4$. Se modeló con estos vectores y matrices debido a que todos los valores de sus elementos son medibles por lo que el desarrollo teórico puede compararse con la práctica y porque con éstos se puede representar luz total y parcialmente polarizada. Ahora, si S' es el estado medido a la salida de la fibra y S es el estado inicialmente acoplado a ésta el sistema de control debe ser tal que:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ 0 & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde la matriz que premultiplica a S' es la multiplicación de las tres matrices de los retardadores que se utilicen (ver sección III).

Esto último descrito por (6) se comprobó para una polarización lineal a 0° cuyo vector ideal normalizado es:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

y donde el vector resultante de las mediciones a la salida de la fibra fue:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -0.0724 \\ 0.9420 \\ -0.2173 \end{bmatrix} \quad (8)$$

lo que nos representa un EDP con un azimut (α)=42.8° y elipticidad ($e=\tan|\omega|$)=0.1099 (α y e pueden expresarse en función de I, Q, U y V [1]); estas mediciones se realizaron una vez que los tres retardadores hechos con la fibra ya estaban implementados a 0° con respecto al eje x por lo que no influían en las mediciones ya que la matriz que describe la multiplicación de las matrices correspondientes a dos retardadores de cuarto de longitud de onda por la matriz de uno de media, todas a 0°, es una matriz identidad.

Los elementos de (8) se transformaron en:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.9661 \\ 0.1186 \\ -0.0677 \end{bmatrix} \quad (9)$$

lo cual representa un EDP con $\alpha=3.4^\circ$ y $e=0.0338$ con un 97% de polarización lineal. Este resultado se logró después de que el programa de simulación implementado en C para la búsqueda de los ρ 's óptimos, teniendo como entrada los datos dados en (7) y (8), encontró los ángulos para transformar (8) en:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.9694 \\ 0.0004 \\ 0.0002 \end{bmatrix} \quad (10)$$

que es el EDP mas cercano obtenible en la práctica con este control a la polarización deseada representada en (7). Los ángulos calculados fueron $\rho=38.5^\circ$ para un retardador de $\lambda/4$ y $\rho=-3.5^\circ$ para el otro

retardador de $\lambda/4$ y de $\rho=-46^\circ$ para el retardador de $\lambda/2$, los resultados obtenidos en la práctica son los dados en (9). En la Fig. 4 se muestra todo el sistema y la inclinación de los componentes del controlador de polarización a los ángulos ya mencionados.

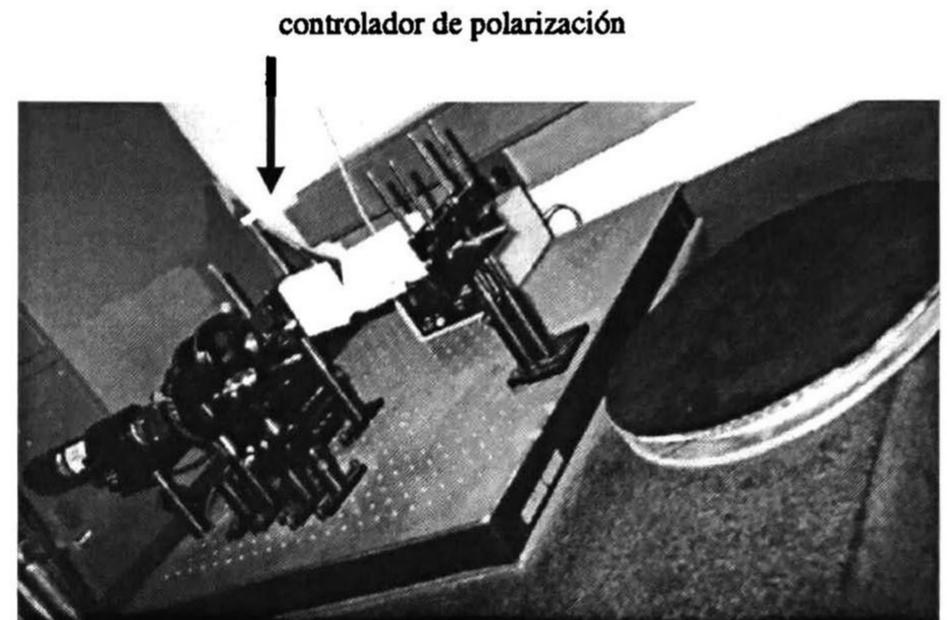


Figura 4.

Se verificó también que con este mismo arreglo se pueden controlar tanto una polarización horizontal ($\alpha=0^\circ$) como una vertical ($\alpha=90^\circ$), lo cual es aprovechable cuando se trata de sistemas de modulación binaria por polarización (*binary polarization modulation*) [5] en los que se requieren dos polarizaciones ortogonales.

Conclusiones.

La implementación de retardadores con la fibra óptica es un proceso simple de realizar. Por otra parte, las diferencias entre el vector ideal y el que resulta de las mediciones se deben entre otros factores a las imperfecciones de los polarizadores, retardadores, variaciones en los ángulos en el momento de posicionarlos a los ángulos calculados por el programa de simulación y por la repercusión de la exactitud y

resolución del sistema de medición asociado al detector de intensidad, a pesar de esto los resultados que se pueden obtener empleando el controlador de polarización que se describe en el presente trabajo son satisfactorios.

Nota: La expresión en (6) se comprobó también para un EDP lineal con $\alpha=45^\circ$. Los controladores de polarización siguen produciendo buenos resultados cuando la longitud de la fibra es mayor a 20 metros [9].

[1] Kliger David S., James W. Lewis, Cora E. Randall, 1990, Polarized Light in Optics and Spectroscopy, Academic Press. Inc.

[2] Matsumoto T., R. Nagase, H. Kano, 1988, "Proposal for a fibre-optic endlessly rotatable fractional wave device and its applications to lightwave technologies", Electron. Commun. Japan, vol. 71, no. 6, pp. 36-47.

[3] Lefevre H. C., 1980, "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers", Electron. Lett. vol. 16, no. 20, pp 778-780.

[4] Frins Erna M. and Wolfgang Dultz, 1997, "Rotation of the Polarization Plane in Optical Fibers", Journal of Lightwave technology, vol. 15, no. 1, pp.144-147.

[5] Betti Silvello, Giancarlo DeMarchis, Eugenio Iannone, 1995, Coherent Optical Communications Systems, John Willey & Sons, Inc.

[6] Scholl Bernhard, Thomas Stein, Arndt Neues, Konrad Mertens, 1995, "In-line fiber optic polarimeter with a 99% coupler", Optical Engineering, vol. 34, no. 6, pp. 1669-1671.

[7] Senior John M.,1992, Optical Fiber Communications Principles and Practice. Prentice Hall, 2a. Ed.

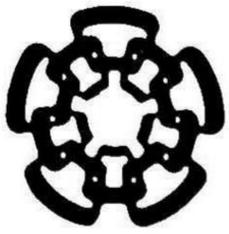
[8] Gerrard A., J. M. Burch, 1994, "Introduction to Matrix Methods in Optics", Dover Publications.

[9] Yasuaki Kidoh, Yasuhiro Suematsu, and Kazuhito Furuya, 1981, "Polarization Control on Output of Single-Mode Optical Fibers", Journal of Quantum Electronics, vol. QE-17, no. 6, pp. 991-994.

Referencias

- [1] Miller Stewart E., Ivan P. Kaminow. *Optical Fiber Telecommunications II*. Academic Press (1988).
- [2] Lefevre H. C., 1980, "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers", *Electron. Lett.*, Vol. 16, No. 20, pp. 778-780.
- [3] Ruiz Soto Gabriela M., 1996, "A division of wavefront polarimeter and optical analysis of red blood cells", PhD Thesis, Loughborough University.
- [4] Peñarrocha Vicent, *Instrumentación de Comunicaciones*, Universidad Politécnica de Valencia (1996).
- [5] Kliger David S., James W. Lewis, Cora E. Randall, *Polarized Light in Optics and Spectroscopy*, Academic Press. Inc. (1996).
- [6] Pozar David M., *Microwave Engineering*, Addison-Wesley (1990).
- [7] Shih-Yau Lu, Russell A. Chipman, 1996, "Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition", *Opt. Soc. Am.*, Vol. 13, No. 5, pp. 1-8.
- [8] Shurcliff W. A., *Polarized Light*, Harvard University Press: Cambridge Massachusetts (1962).
- [9] Gowar John, *Optical Communications Systems*, Second edition. Prentice Hall (1993).
- [10] Senior John M., *Optical Fiber Communications Principles and Practice*. Second edition. Printice Hall (1992).
- [11] Simon A., R. Ulrich, 1977, "Evolution of polarization along a single-mode fiber", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 31, No. 8, pp. 517-520.
- [12] Harmon R. A., 1982, "Polarisation stability in long lengths of monomode fibre", *Electron. Lett.*, Vol. 18, No. 24, pp. 1058-1060.
- [13] Betti Silvello, Giancarlo DeMarchis, Eugenio Iannone, *Coherent Optical Communications Systems*, John Willey & Sons, Inc. (1995).
- [14] Frins Erna M. and Wolfgang Dultz, 1997, "Rotation of the Polarization Plane in Optical Fibers", *Journal of Lightwave technology*, Vol. 15, No. 1, pp.144-147.

- [15] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale, 1979, “*Curvature and microbending losses in single mode optical fibres*”, *Opt. Quantum Electron.*, 11, pp. 43-59.
- [16] Gerrard A., J. M. Burch, *Introduction to Matrix Methods in Optics*, Dover Publications Inc. (1994).
- [17] Azzam R. M. A., N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland Personal Library (1986).
- [18] Scholl Bernhard, Thomas Stein, Arndt Neues, Konrad Mertens, 1995, “*In-line fiber optic polarimeter with a 99% coupler*”, *Optical Engineering*, Vol. 34, No. 6, pp. 1669-1671.
- [19] Newport Corporation, 1986. *Projects in Single-Mode Fiber Optics. Applications Workbook.*
- [20] Muncheryan Hrad M., *Laser and Optoelectronic Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation (1991).
- [21] Davis Christopher C., *Lasers and Electro-Optics Fundamentals and Engineering*, Cambridge University Press (1996).
- [22] Newport, 1998. *Detector Calibration Report.*



**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
UNIDAD GUADALAJARA**

El Jurado designado por el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, aprobó la tesis: "Control del estado de polarización en fibras ópticas monomodo" el día 23 de Julio de 1999.

Dr. Arturo Veloz Guerrero
Investigador Cinvestav 3A
CINVESTAV DEL IPN
Guadalajara

Dr. Deni Librado Torres Román
Investigador Cinvestav 2C
CINVESTAV DEL IPN
Guadalajara

Dr. José Luis Ramos Quirarte
Profesor Investigador Titular A
Departamento de Electrónica
Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería
Universidad de Guadalajara.



CINVESTAV
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000003835