

**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN**  
**CAMPUS LOMA BONITA**

---

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL  
INTERFERÓMETRO DE SAGNAC DE FIBRA  
ÓPTICA PARA APLICACIONES COMO  
DISPOSITIVO SENSOR**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN OPTIMIZACIÓN Y CONTROL DE SISTEMAS**

**P R E S E N T A**

**ING. ALFONSO OSORIO IGNACIO**

**ASESOR DE TESIS  
DR. FRANCISCO GUTIÉRREZ ZAINOS**

**LOMA BONITA, OAX.**

**OCTUBRE, 2015.**





# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

## CAMPUS TUXTEPEC

### DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Tuxtepec, Oaxaca a 16 de Julio de 2015

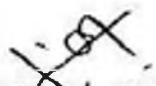
**Ing. Alfonso Osorio Ignacio**  
**Estudiante de la Maestría en Optimización y Control de Sistemas**  
**Universidad del Papaloapan**

Por este medio le informo que el jurado para su examen para obtener el grado en Maestro en Optimización y Control de Sistemas estará integrado por los siguientes investigadores

Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández	UNPA	Presidente
Dr. Jorge Luis Camas Anzueto	ITCh	Vocal
Dr. Rafael Castillo Rincón	UNPA	Secretario
Dr. Mauro Sánchez Sánchez	UNPA	1er Suplente
Dr. Álvaro Cabrera Amado	UNPA	2o Suplente

Sin más por el momento, le envío saludos cordiales.

Atentamente

  
M en C. Héctor López Arjona  
Vice-rector Académico



Ccp Dr. Francisco Gutiérrez Zainos, Asesor  
Ccp LP Yesenia Barrientos Arrenal, Jefe de Servicios Escolares  
Ccp Archivo

VICE-RECTORIA  
ACADEMICA

CAMPUS TUXTEPEC

C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial.  
C.P. 38301, Tuxtepec, Oax. Tel. 01(287)8759240

[www.unpa.edu.mx](http://www.unpa.edu.mx)

CAMPUS LOMA BONITA

Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.  
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax. Tel. 01(281)8729230



# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, a 18 de Septiembre de 2015

**LP Yesenia Barrientos Arenal**  
Jefa de Servicios Escolares  
Universidad del Papaloapan

Sirva la presente para informarle que el jurado del examen para obtener el grado de Maestro en Optimización y Control de Sistemas del IE. Alfonso Osorio Ignacio, matrícula 12070003, ha autorizado la impresión del manuscrito que lleva por título "**Estudio teórico y experimental del interferómetro de Sagnac de fibra óptica para aplicaciones como dispositivo sensor**" para su posterior presentación y defensa por parte del sustentante.

Sin otro asunto en particular me despido quedando atento ante cualquier duda o aclaración.

Atentamente

**Dr. Mario Valera Zaragoza**

Jefe de la División de Estudios de Posgrado  
[mvalera@unpa.edu.mx](mailto:mvalera@unpa.edu.mx), [mario\\_valzar@hotmail.com](mailto:mario_valzar@hotmail.com)



Ccp IE. Alfonso Osorio Ignacio  
Ccp Archivo

**CAMPUS TUXTEPEC**  
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial. C.P. 38301, Tuxtepec, Oax.  
Tel. 01(287)8759240

[www.unpa.edu.mx](http://www.unpa.edu.mx)

**CAMPUS LOMA BONITA**  
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.  
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.  
Tel. 01(281)8729230

---

# DEDICATORIA

---

*A Dios, A mi Papá*  
*y*  
*A mi Mamá por todo.*

---

# AGRADECIMIENTOS

---

**Por el éxito y la satisfacción de esta presente**

*Gracias a mis padres en reconocimiento a todo el apoyo brindado a través de mis estudios y con la promesa de seguir siempre adelante.*

*Gracias al Dr. Francisco Gutiérrez Zainos por sus excelentes consejos y dirección como profesional y persona.*

*Gracias a todas aquellas personas que me brindaron su colaboración, sus conocimientos, su ayuda incondicional y por sobre todo su amistad durante el proceso de la maestría, investigación y redacción de este trabajo.*

---

# RESUMEN

---

Este trabajo presenta un estudio teórico y experimental para desarrollar y sentar bases en sensores empleando el interferómetro de Sagnac de fibra óptica aplicados a sistemas de control mecatrónicos.

El estudio teórico contiene, el principio de funcionamiento del interferómetro de Sagnac así como los cambios en transmisión y comportamiento de la polarización de la luz que viaja dentro de la fibra, atenuaciones en la estructura de la fibra, e interferencia. Al mismo tiempo se incluye un estudio experimental, delimitado con arreglos interferométricos, encaminados a determinar los cambios o efectos que se producen por una alteración o perturbación externa en el lazo de fibra que se ven reflejados en cambios en la transmisión (intensidad de luz de salida) del interferómetro de Sagnac. Por último se presentan dos aplicaciones y se propone como trabajo futuro un sensor de fibra con recubrimiento metálico bajo la técnica de plasmones superficiales (SPR), cuyo principio de funcionamiento se basa en el control de los estados de polarización que intervienen en el sensor con una posible mejora en su respuesta, ampliando las aplicaciones del interferómetro de Sagnac de fibra extraordinariamente.

---

# ABSTRACT

---

This work presents a theoretical and experimental study to develop and lay a foundation in sensors using the Sagnac interferometer optical fiber applied to mechatronic control systems.

The theoretical study contains the operating principle of the Sagnac interferometer as well as changes in transmission and polarization behavior of light traveling within the fiber, attenuations in the fiber structure and interference. At the same time an experimental study is included, delimited interferometric arrangements, aimed at identifying changes or effects that occur by alteration or external perturbation in the loop of the fiber that are reflected in changes in transmission (light intensity output) of the Sagnac interferometer. Ultimately, two applications are presented and proposed as a future work. A sensor fiber with metal coating under the technique of surface plasmons (SPR), whose operating principle is based on controlling the polarization states that intervene in the sensor with a possible improvement in their response, extraordinarily expanding the applications of the fiber Sagnac interferometer.

Revision of abstract by:  
Profa. Cheryl Lynn Gad  
Jefa del Centro de Idiomas  
Universidad del Papaloapan  
Campus Loma Bonita  
Date: July 13, 2015

---

# CONTENIDO

---

	Pág.
<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>V</b>
<b>Introducción</b>	<b>VIII</b>
<b>Capítulo 1. Fibra óptica</b>	<b>1</b>
1.1 Consideraciones generales de las fibras ópticas	2
1.2 Propiedades de las fibras ópticas	3
1.2.1 Apertura numérica	4
1.2.2 Perfil de índice de refracción	5
1.2.3 Ancho de banda	7
1.2.4 Diámetro de campo modal	8
1.2.5 Longitud de onda de corte	8
1.2.6 Atenuación	8
<b>Capítulo 2. Polarización e interferencia</b>	<b>18</b>
2.1 Estados de polarización	19
2.1.1 Polarización lineal	20
2.1.2 Polarización circular	21
2.1.3 Polarización elíptica	22
2.2 Interferencia	25
2.2.1 Superposición de ondas transversales	25

---

<b>Capítulo 3. Interferómetro de Sagnac de fibra óptica</b>	<b>33</b>
3.1 Antecedente del interferómetro de Sagnac de fibra óptica	34
3.2 Principios de operación del interferómetro de Sagnac de fibra óptica de acuerdo a las fases	36
3.3 Operación del interferómetro de Sagnac de fibra óptica en la región lineal	38
3.4 Matriz de Jones del interferómetro de Sagnac de fibra	42
<b>Capítulo 4. Descripción de las pruebas experimentales</b>	<b>47</b>
4.1 Consideraciones generales	48
4.2 Montajes experimentales del interferómetro de Sagnac	48
4.2.1 Etapa de la apertura numérica (alineación del láser)	48
4.2.2 Etapa del control de polarización	50
4.2.3 Análisis y resultados de arreglos interferométricos	51
<b>Capítulo 5. Perspectivas del trabajo y conclusiones finales</b>	<b>61</b>
5.1 Análisis numérico del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos QWP en el lazo	62
5.2 Arreglo experimental del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos QWP como sistema de control	68
5.3 Arreglo experimental del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos QWP como monitoreo de vibraciones mecánicas	74
5.4 Desarrollo de un sensor bajo la técnica de plasmones superficiales (SPR) empleando el interferómetro de Sagnac de fibra	79
5.5 Conclusiones finales	83
<b>Anexo I: Ondas longitudinales y transversales</b>	<b>86</b>
<b>Anexo II: Equipos y materiales empleados</b>	<b>88</b>
<b>Anexo III: Elaboración del QWP</b>	<b>92</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>

---

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura		Pág.
1.1.	Componentes de la fibra óptica.	2
1.2.	Propiedades de las fibras ópticas.	4
1.3.	Esquema de la apertura numérica.	5
1.4.	Fibra óptica multimodo de salto de índice, multimodo de índice gradual y monomodo.	6
1.5.	Rayo dispersado en dos direcciones, pérdidas de Rayleigh.	11
1.6.	Fibra doblada, pérdidas por macrocurvatura.	13
1.7.	Pérdidas debido a una microcurvatura.	14
1.8.	Pérdida de conexión de Fresnel.	15
1.9.	Distintas pérdidas que pueden producirse en una fibra óptica.	17
2.1.	Luz polarizada linealmente.	20
2.2.	Luz polarizada circularmente.	21
2.3.	Luz polarizada elípticamente.	23
2.4.	a) y b) Las ondas están en fase, cresta sobre cresta. c) y d) Las ondas están desfasadas en $180^\circ$ y los valles se superponen a las crestas.	29
2.5.	Ondas de dos fuentes puntuales superpuestas espacialmente.	30
3.1.	Dos formas del interferómetro de Sagnac.	35
3.2.	Interferómetro de Sagnac de fibra óptica.	36
3.3.	Campos de entrada y salida en el interferómetro.	42
4.1.	Etapa de la apertura numérica (alineación del láser).	49
4.2.	Arreglo polarimétrico usado para estudiar la polarización.	50
4.3.	a) Polarización lineal, b) Polarización circular y c) Polarización elíptica.	51

4.4.	Tramo de fibra torcida.	52
4.5.	Primer arreglo interferométrico propuesto.	53
4.6.	Amplitud de salida del primer arreglo interferométrico al aplicarle 3 Newtons de fuerza a un trozo del lazo.	54
4.7.	Segundo arreglo incluyendo la QWP en el lazo.	55
4.8.	Amplitud de salida del segundo arreglo interferométrico propuesto con QWP en el lazo.	56
4.9.	Representación esquemática de la evolución de la polarización en el interferómetro bajo estudio.	56
4.10.	Tercer arreglo interferométrico propuesto.	57
4.11.	Variaciones de amplitud en el tiempo producidas por la rotación de la bobina de fibra.	58
4.12.	Amplitud y simetría producida al rotar la QWP.	59
5.1.	Esquema del FOLM.	62
5.2.	Primera comparación de los resultados entre la simulación numérica y el experimental.	66
5.3.	Segunda comparación de los resultados entre la simulación numérica y el experimental.	67
5.4.	Esquema propuesto del interferómetro de Sagnac como sistema de control con dos QWP.	69
5.5.	Rotación de las QWP para controlar y estabilizar la amplitud a una referencia deseada, a) 2.8V, b) 5V y c) 6.8V.	70
5.6.	Comparación del sistema con un diagrama a bloques de un control en lazo cerrado donde una persona actúa como controlador.	72
5.7.	Visualización de una posible implementación de la posición de las QWP en un vehículo de vuelo donde una perturbación origina un desequilibrio captado por una QWP.	73
5.8.	Esquema del interferómetro de Sagnac para el monitoreo de vibraciones.	75
5.9.	Comparación de la frecuencia de vibración producida en la fibra óptica por la placa de Chladni a 28.57 Hz. a) Señal de salida del	

---

	interferómetro, b) frecuencia de vibración de la placa de Chladni.	76
5.10.	Comparación de la frecuencia de vibración producida en la fibra óptica por la placa de Chladni a 322.6 Hz. a) Señal de salida del interferómetro, b) frecuencia de vibración de la placa de Chladni.	77
5.11.	Arreglo experimental propuesto. El sensor SPR de fibra se coloca en el lazo de fibra que forma el interferómetro y experimenta dos estados de polarizaciones iguales o diferentes dependiendo si se coloca una o dos QWP.	80
5.12.	Dos rayos meridionales en una guía, excitando un sensor SPR para aumentar su sensibilidad.	82
I.1.	Onda longitudinal producida por un muelle en espiral.	86
I.2.	Onda transversal producida por una cuerda.	87
II.1.	a) Mesa tipo Holográfica, b) Empalmadora para fibra óptica, c) Osciloscopio, d) Controladores de polarización de tres paletas (27 mm y 56 mm), e) Controlador de láser, f) Detector para fibra óptica, g) Acoplador de fibra óptica 50/50 a una longitud de onda de 980 nm, h) Diodo laser a una longitud de onda de 980 nm, i) Fibra óptica monomodo a una longitud de onda de 980 nm.	91
III.1.	Vista lateral y axial de la QWP.	93

---

# INTRODUCCIÓN

---

La capacidad de transmitir la información y los medios utilizados, es quizás el responsable de la evolución de la tecnología actual que se ve reflejada en el resultado de muchos inventos y descubrimientos brillantes.

Desde la invención del láser en 1960 hasta la actualidad se han encontrado infinidad de aplicaciones para éste y se sigue descubriendo otras sorprendentes en las que la luz coherente y sus propiedades son imprescindibles. Ahora bien, la interferometría (técnica que aprovecha las propiedades ondulatorias de la luz para desarrollar dispositivos de medición de gran sensibilidad y resolución) lo hace de gran utilidad en prácticamente cualquier rama de la industria y la investigación. Por consiguiente el interferómetro es el instrumento de medición más preciso y sensible conocido por el hombre hasta ahora y un componente fundamental en la interferometría actual es la fibra óptica.

Asimismo el progreso de la fibra óptica de hoy, ofrece un ancho de banda casi ilimitado y ventajas únicas sobre todo en los medios de transmisión, lo que ha generado el nacimiento de una generación de dispositivos interferométricos (sensores), interactuando en medios corrosivos en donde la electricidad puede ser muy peligrosa. Igualmente la fibra óptica ha ampliado los límites de nuestro desarrollo tecnológico en todas las áreas e incluso en sistema o mecanismos ópticos, enfocando principalmente los avances en los láseres [1,2], en el estudio de los plasmones [3], en la nanotecnología [4] y en el de dispositivo de conmutación óptica [5, 6, 7]. Ya que los sistemas o mecanismos ópticos que emplean fibra óptica, permiten manipular la luz y modificar sus propiedades para lograr por medios mínimamente invasivos resultados de alta calidad, son empleados en aplicaciones médicas, de instrumentación y de metrología [8].

El presente trabajo de tesis trata el estudio del Interferómetro de Sagnac de fibra óptica como dispositivo sensor para desarrollar sensores aplicados a sistemas mecatrónicos. En específico, esta tesis presenta un análisis experimental complementado con su simulación numérica, que estudia el comportamiento del interferómetro de Sagnac para ser utilizado como dispositivo sensor. Se presentan dos propuestas de aplicación y se hace mención de una propuesta de sensor bajo la técnica de plasmones superficiales (SPR) que dejan pauta para trabajos futuros siguiendo esta línea de investigación

En este contexto los objetivos de la presente tesis son los siguientes:

- Entender el fenómeno de la interferencia y polarización de la luz (lineal, circular y elíptica) y el comportamiento de la polarización de la luz dentro de una fibra óptica.
- Realizar un estudio teórico, construir y analizar experimentalmente el interferómetro de Sagnac de fibra óptica. Dicho análisis incluye realizar pruebas de la transmisión del interferómetro para una entrada con polarización circular. Así como observar el comportamiento de la transmisión por influencia de la polarización a cambios en la estructura del lazo de fibra, torsión en la fibra, compresión, etc.
- Sentar las bases, con los resultados más relevantes para proponer dicho sistema interferométrico como sensor aplicado en sistemas de control mecatrónicos.

El plan de la tesis es el siguiente:

- El capítulo 1 se inicia con un horizonte preliminar de la fibra óptica y luego se ofrece unas breves consideraciones generales. La fibra óptica es una amplia rama de la óptica que llevaría a temas extensos para conocer todas sus propiedades a fondo. Afortunadamente, para entender las aplicaciones prácticas en sensores que se afronta es de interés solo dar una perspectiva que describa las nociones fundamentales en propiedades ópticas y de transmisión. Primordialmente en esta última donde las pérdidas ópticas se ven reflejadas en gran medida sobre la potencia de la señal.
- En el capítulo 2 se procede con una breve explicación de la polarización e interferencia. Tener conocimientos en estos campos ayuda a comprender mejor la teoría de la luz en general, además clarifica muchas aplicaciones prácticas del interferómetro de Sagnac de fibra óptica que se están desarrollando con el uso de la luz polarizada e interferencia.
- En el capítulo 3 se explica la teoría necesaria del interferómetro de Sagnac de fibra óptica, con el fin de conocer una interpretación matemática que sirve para verificar los resultados experimentales.
- En el capítulo 4 se presenta una descripción de la alineación del láser y el control de polarización. Se hace un análisis experimental con tres arreglos para estudiar el comportamiento de la transmisión del interferómetro de Sagnac y así obtener las características que lo hacen adecuado para ser empleado como dispositivo sensor.
- El capítulo 5 se presenta las perspectivas del trabajo y conclusiones finales a las que ha llevado este trabajo de tesis.

## CAPÍTULO 1

---

# FIBRA ÓPTICA

---

Hoy en día, el medio de transmisión por excelencia es la fibra óptica que junto con la luz láser producen una brillante combinación. La fibra óptica surgió para revolucionar los procesos de las telecomunicaciones, logrando una mayor velocidad en la transmisión, disminuyendo casi en su totalidad los ruidos e interferencias y por si fuera poco multiplicar las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica. Este campo es extremadamente dinámico; la investigación en fibra óptica sigue avanzando día con día, no sólo para mejorar las características de las fibras para telecomunicaciones, sino también en el desarrollo de nuevas aplicaciones. Las aplicaciones que hasta el momento se han hecho de la fibra óptica en México son en telefonía, televisión y control de procesos. En el panorama mexicano aparecen también varios centros de investigaciones estatales, universitarias y de empresa; unos dedicados a investigación básica y otros dedicados al desarrollo de equipos transmisores optoelectrónicos. Así poco a poco la fotónica está reemplazando a la electrónica, con sistemas que resultan más rápidos y eficientes; la fibra óptica ha sido el primer avance importante en esa dirección convirtiéndose en una de las tecnologías más avanzadas.

## 1.1 Consideraciones generales de las fibras ópticas

Las fibras ópticas es definida como una rama de la óptica con división en la comunicación, para la transmisión de la luz y frecuencias infrarrojas generadas por un LASER o LED'S a través de filamentos de fibras transparentes de vidrio o de plástico generalmente en forma cilíndrica [9].

Existen varios tipos de fibra óptica según el uso a emplear, y éstas también contienen tantos recubrimientos exteriores dependiendo de la protección que se desee dar a la fibra, si bien no es posible proporcionar una lista completa de todos los tipos de fibra especiales disponibles en la actualidad, pero como se observa en la figura 1.1 todas ellas se componen básicamente por tres estructuras concéntricas: núcleo (core), revestimiento (cladding) y un recubrimiento (buffer) [10, 11].



Figura 1.1. Componentes de la fibra óptica.

El índice de refracción de núcleo es mayor que el del revestimiento [12, 13], razón por la cual, la luz introducida al interior de la fibra se mantiene y propaga a través del núcleo. Asimismo dependiendo del tamaño del núcleo en relación con la longitud de onda, las fibras pueden ser monomodo o multimodo. Las primeras tienen un núcleo muy pequeño, que solo puede albergar el modo transversal fundamental, y son las más eficientes en telecomunicaciones. Las segundas pueden albergar varios modos transversales simultáneamente por tener un núcleo mucho más grande.

También hay fibras de plástico [11] que tienen ventajas sobre las fibras de vidrio por ser más flexibles y más fuertes, fáciles de instalar, pueden resistir mejor la presión, son menos costosas y pesan aproximadamente 60% menos que el vidrio. La desventaja es su característica de atenuación alta: no propagan la luz tan eficientemente como el vidrio. Por tanto las de plástico se limitan a distancias relativamente cortas, como puede ser dentro de un solo edificio [14].

No obstante, en el año 2013 se presentó un nuevo rediseño de la fibra basado en que la luz se propaga a mayor velocidad en el aire que en el cristal, por lo que dejaron hueco el núcleo de la fibra y mejoraron su cubierta. Particularmente consiguiendo producir un cable de fibra óptica que puede mover información a un 99,7% de la velocidad de propagación de la luz en el vacío [15]. Esta fibra óptica de aire podría usarse para aplicaciones industriales y a nivel de servidores en un futuro cercano, considerando que la fibra óptica tradicional de vidrio o plástico recién se está adaptando.

## 1.2 Propiedades de las fibras ópticas

Las propiedades de las fibras ópticas dependen de su estructura, de su composición y fenómenos que la pueden perjudicar. En general todas las propiedades de las fibras ópticas son de gran relevancia y pueden encajar en

cuatro grandes grupos como se muestra en la figura 1.2. Sin embargo las propiedades ópticas y de transmisión son de importancia primordial cuando se evalúa el uso de algún tipo de fibra en aplicaciones para sensores, especialmente las características de la atenuación (pérdidas de señal) son de mayor interés. En este sentido, se estudiarán las características de estas dos propiedades sin profundizar en las herramientas matemáticas, con el objetivo de entender los mecanismos que producen las pérdidas y sus efectos en el interferómetro de Sagnac.

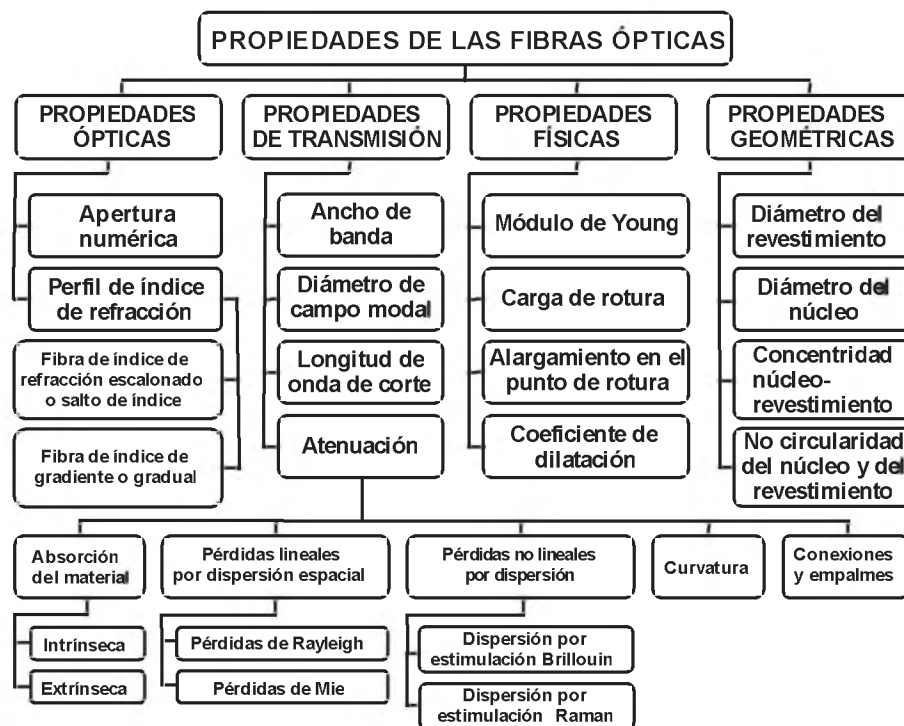


Figura 1.2. Propiedades de las fibras ópticas.

### 1.2.1 Apertura numérica

La apertura numérica de una fibra óptica se define como el seno del semiángulo del cono de luz que incide desde el aire en el extremo de entrada de una fibra óptica, de tal manera que todos los rayos que tienen una dirección que

se encuentra dentro del cono serán atrapados dentro del núcleo una vez que entran en la fibra [12] y se encontrarán con un ángulo mayor al crítico, por lo tanto serán guiados dentro del núcleo sin refracción. Los que estén fuera del cono sufrirán sucesivas refracciones y se atenuarán paulatinamente en los primeros metros de la fibra óptica. Así, la apertura numérica es vista como un parámetro que da idea de la cantidad de luz que puede ser guiada por una fibra óptica como vemos en la figura 1.3. De la misma forma si dos fibras ópticas tienen igual apertura numérica se tiene que el ángulo de emisión de luz es igual al de aceptación de la siguiente y por lo tanto se produce un acoplamiento de luz perfecto.

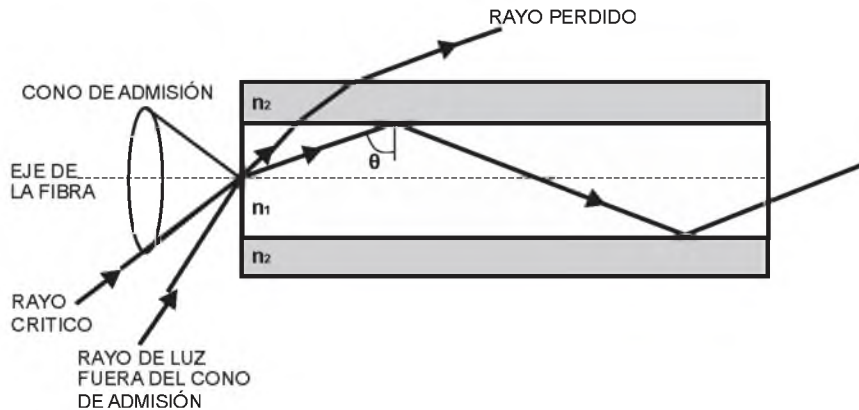


Figura 1.3. Esquema de la apertura numérica.

### 1.2.2 Perfil de índice de refracción

La velocidad de la luz depende del material a través del cual se está moviendo. Cuando se pasa a través de un material transparente, se ralentiza por una cantidad dependiente de una propiedad del material llamado índice de refracción ( $n$ ). Esto se obtiene a partir de la siguiente relación.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el espacio libre y  $v$  es la velocidad de la luz en el material. De esta manera cuanto menor es el índice de refracción, mayor es la velocidad de la luz en el material. Para la mayoría de los materiales que utilizamos en la fibra óptica, el índice de refracción está en la región de 1.5 [16].

Sin embargo la fibra óptica presenta una variación de índice de refracción conforme nos movemos en la sección transversal. El perfil del índice se da respecto al criterio de dimensiones y frontera del núcleo y del revestimiento es decir, el índice de refracción del núcleo y el revestimiento no son constantes a través de sus áreas de superficie en todas las fibras. Por ejemplo, la fibra multimodo de índice gradual tiene un índice de refracción cambiante gradual en el núcleo y el revestimiento. Para ayudar a distinguir entre las fibras ópticas, se especifican generalmente con un perfil de graficado de sus índices de refracción. Relacionándose igualmente con el modo de propagación de la luz dentro del núcleo de la fibra, por lo que existen tres tipos de fibras ópticas de acuerdo al criterio de modo de propagación como se muestra en la figura 1.4 [17].

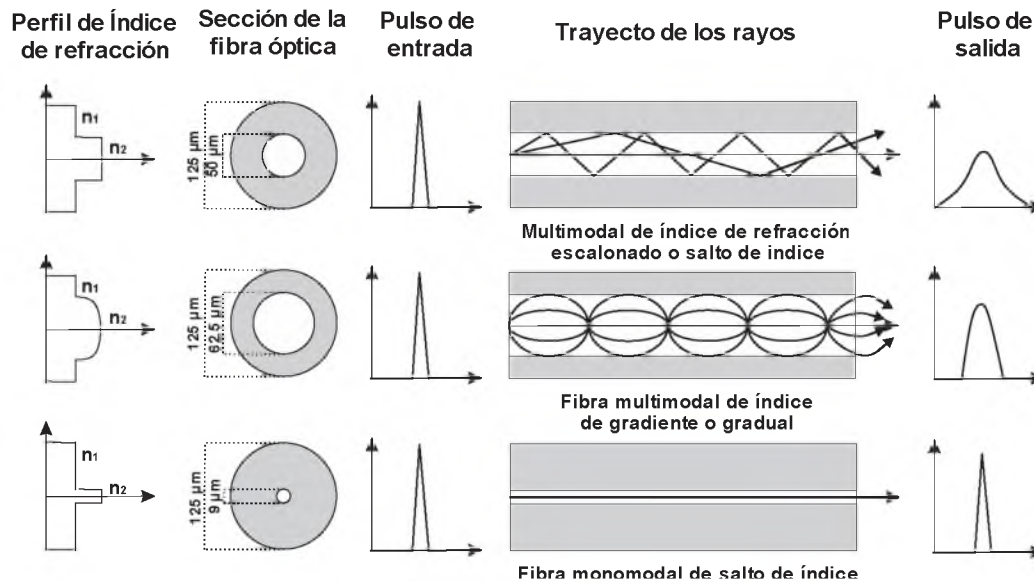


Figura 1.4. Fibra óptica multimodo de salto de índice, multimodo de índice gradual y monomodo.

La llamada fibra multimodal de índice de refracción escalonado o salto de índice se usa en la transferencia convencional de imágenes, así como en la transmisión de datos en distancias cortas. Generalmente la fibra de salto de índice se compone de un núcleo de vidrio de índice de refracción constante de su sección transversal, rodeado por un revestimiento de un índice de refracción diferente. Debido a este cambio repentino en el índice de refracción, la luz se refleja en la interfaz núcleo-revestimiento y sigue su camino hacia abajo a través del núcleo produciéndose saltos constante a lo largo de todo el mismo [13,17]. Por lo que para largas distancias y gran velocidad en la transmisión de datos se emplea la fibra monomodal de salto de índice, que tiene poca diferencia de índice de refracción y núcleo de tamaño pequeño [14].

En la fibra multimodal de índice de gradiente o gradual, el índice de refracción es constante en el revestimiento, pero su núcleo tiene un cambio gradual. El centro del núcleo tiene el más alto índice de refracción que se reduce gradualmente conforme se acerca a los bordes del núcleo. Debido a este índice de refracción cambiante suave, los rayos de luz se refractan a medida que avanza a través del núcleo, y establece un conjunto de patrones de ondas sinusoidales [13, 17]. Esta fibra es óptima para las distancias intermedias.

### 1.2.3 Ancho de banda

El ancho de banda operativo no corresponde con cambios en la frecuencia en la medida en que lo hace el cable de cobre, está más directamente relacionado con la distancia. Todos los factores que afectan el ancho de banda aumentarán a medida que la longitud de los cables de fibra aumente. El ancho de banda de una fibra se da en las hojas de datos del fabricante como ancho de banda de frecuencia por kilómetros [17].

### 1.2.4 Diámetro de campo modal

Da idea de la extensión de la mancha de luz del modo fundamental a la salida de la fibra. Su valor aumenta conforme la longitud de onda de la luz guiada es mayor, es de gran importancia en las características de la fibra monomodo y en este hecho el diámetro del campo monomodal formalmente se define como la inversa del ancho cuadrático medio de la distribución del campo de emisión lejano de la fibra óptica. A partir de él se puede calcular posibles pérdidas en empalmes, pérdidas por microcurvaturas y dispersión cromática de la fibra. Normalmente el diámetro del campo modal está determinado por el diámetro del núcleo y es un 15% mayor a éste.

### 1.2.5 Longitud de onda de corte

La fibra óptica monomodo no guía un único rayo para todas las longitudes de onda. Solo a partir de una longitud de onda óptica se comporta como monomodo, para longitudes de onda por debajo de ese valor la fibra óptica guía varios rayos de luz y se comporta como multimodo. La longitud de onda en la que se produce la separación entre monomodo y multimodo para una fibra óptica se llama longitud de onda de corte.

### 1.2.6 Atenuación

La fibra óptica de vidrio, es considerada un material frágil que puede ser dañado y deteriorada por distintas causas que se reflejan con pérdidas o atenuaciones en la fibra óptica. Estas pérdidas o atenuaciones influyen en la propagación de la luz representando un factor limitante al reducir la potencia de la señal al llegar al receptor óptico que necesita una cierta cantidad mínima de

energía para la recuperación de la señal con precisión, siendo la distancia de transmisión inherentemente limitado por las pérdidas de la fibra [13].

### **Absorción del material**

Aunque el proceso de fabricación de la fibra óptica, los requisitos para la limpieza, la pureza y control de calidad son tan estrictos como las aplicadas a la industria de los semiconductores, se presentan impurezas siendo imposible producir 100% de vidrio puro [17]. Provocando que cualquier material implicado en la fibra absorba ciertas longitudes de onda correspondientes a las resonancias electrónicas y vibratorias asociados con moléculas específicas [13]. Por lo que la absorción del material se puede dividir en dos categorías.

- **Intrínseca**

Corresponden a la absorción por sílice fundida (material utilizado para hacer fibras). Para moléculas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), la resonancias electrónicas se producen en la región ultravioleta ( $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ ), mientras que las resonancias vibratorias se producen en la región infrarroja ( $\lambda > 7 \mu\text{m}$ ). Debido a la naturaleza amorfa de la sílice fundida, estas resonancias son en forma de bandas de absorción cuyas colas se extienden en la región visible.

- **Extrínseca**

Se refiere a las pérdidas causadas por las impurezas dentro de sílice [13] en forma de moléculas ionizadas [17] que se quedan en la fibra después de la fabricación y bloqueará parte de la energía de la luz [16]. Estas son Impurezas de metales de transición tales como Fe, Cu, Co, Ni, Mn y Cr que absorben fuertemente en el intervalo de longitud de onda  $0.6 - 1.6 \mu\text{m}$  [13] y son sustanciales en vidrio de mala calidad, sin embargo la principal fuente de absorción extrínseca en fibras de sílice son los iones de agua ( $\text{OH}^-$ ), impurezas que resuenan a ciertas frecuencias y se produce en la región de longitud de onda de 850nm [13,17].

### **Pérdidas lineales por dispersión espacial**

Estas pérdidas causan la mayor atenuación de luz en una fibra moderna [18] en su uso lineal. Este fenómeno es generado por partículas u obstrucciones extrañas al medio continuo, que al interactuar con la luz provocan la difracción de la luz en muchas direcciones. De acuerdo a tipo de irregularidades que estén presentes en la fibra se tiene.

- **Pérdidas de Rayleigh**

Esta es la dispersión de la luz debido a los pequeños cambios localizados en el índice de refracción del núcleo y el material de revestimiento [16] puesto que todos los productos manufacturados o material de origen natural nunca son perfectos en su estructura molecular a lo largo de todo su volumen, estas irregularidades son inevitables porque las moléculas y los átomos son naturalmente azar en la naturaleza y se fijan en un patrón aleatorio cuando se forma el material [17]. Hay dos causas que la originan, ambos problemas dentro de los procesos de fabricación. El primero es el de ligeras fluctuaciones inevitables en la mezcla de los ingredientes en donde estos cambios aleatorios son imposibles de eliminar por completo [16]. La segunda causa es ligeros cambios en la densidad que enfría la sílice y se solidifica es decir moléculas de sílice se mueven al azar en el estado fundido y se congelan en su lugar durante la fabricación de la fibra. Fluctuaciones de densidad conducen a fluctuaciones aleatorias del índice de refracción en una escala más pequeña que la longitud de onda óptica  $\lambda$  [19]. Provocando que parte de la luz se escape del núcleo y se pierda por encontrarse ahora con un ángulo de incidencia menor que el ángulo crítico (figura 1.5). La cantidad de dispersión depende del tamaño de la discontinuidad en comparación con la longitud de onda de la luz. La longitud de onda más corta, o más alta frecuencia, sufre la mayoría de dispersión mientras que el grado de dispersión disminuye muy rápidamente con el aumento de longitud de onda. Las pérdidas bajan aceptablemente de dispersión y se consiguen utilizando las longitudes de onda infrarrojas (1300 y

1550nm) [17]. Esto también explica el cielo azul y el rojo de la puesta del sol en la tierra y como la luna no tiene atmósfera, no hay dispersión, y por lo tanto un cielo negro [16].

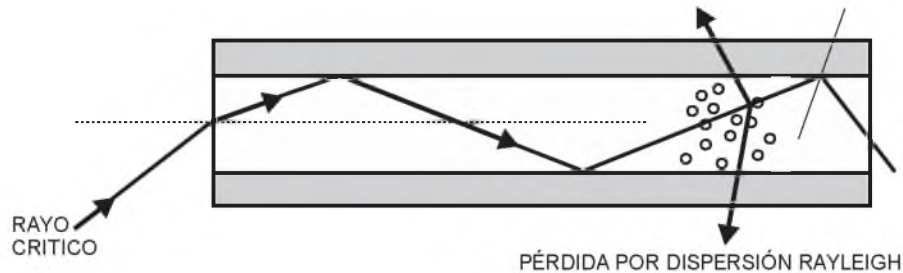


Figura 1.5. Rayo dispersado en dos direcciones, pérdidas de Rayleigh.

#### ▪ Pérdidas de Mie

Se producen a causa de la falta de homogeneidad de índice en una escala más larga que la longitud de onda óptica. Se tiene cuidado en general para asegurar que el radio del núcleo no varía significativamente a lo largo de la longitud de la fibra durante el proceso de fabricación. El proceso físico detrás de estas pérdidas son las imperfecciones físicas e irregularidades en la interface núcleo-revestimiento (por ejemplo, las variaciones del radio del núcleo al azar). Cuando un rayo de luz incide en una de estas imperfecciones, puede cambiar a un modo de orden superior y se disipa a través del revestimiento. Esto se traduce en una mayor atenuación de la señal [13, 17].

#### Pérdidas no lineales por dispersión

Así como la Dispersión de Rayleigh, es un ejemplo de la dispersión elástica en la que la frecuencia de la luz dispersada se mantiene sin cambios. Los procesos Raman y Brillouin son dispersiones inelásticas. Ambos se pueden entender como la conversión de un fotón a un fotón de menor energía de tal manera que la diferencia de energía aparece en la forma de un fonón. Los dos

procesos son inofensivos en potencias bajas porque sus secciones transversales de dispersión son relativamente pequeñas. Sin embargo, llegan a ser estimulados en altos niveles de energía, dando lugar a los fenómenos no lineales de la dispersión por estimulación Brillouin (SBS) y la dispersión por estimulación Raman (SRS) que pueden afectar el desempeño de los sistemas de ondas de luz considerablemente [20].

- **Dispersión por estimulación Brillouin**

Dispersión estimulada de Brillouin (SBS) es un proceso no lineal que puede ocurrir en las fibras ópticas a niveles de potencia de entrada mucho más bajos que los necesarios para la dispersión Raman estimulada (SRS). Se manifiesta a través de la generación de una propagación hacia atrás de una onda de Stokes que transporta la mayor parte de la energía de entrada, una vez que se alcanza el umbral de Brillouin. La dispersión estimulada de Brillouin es típicamente perjudicial para los sistemas de comunicación óptica. Al mismo tiempo, puede ser útil para la fabricación de láseres y amplificadores de Brillouin a base de fibra. Este proceso SBS puede ser resumido como una transferencia de energía de la onda de bombeo a la onda de Stokes [21].

- **Dispersión por estimulación Raman**

Dispersión estimulada de Raman (SRS) es un importante proceso no lineal que puede convertir las fibras ópticas en amplificadores Raman de banda ancha y láseres Raman sintonizable. También puede limitar severamente el rendimiento de los sistemas de ondas de luz multicanal mediante la transferencia de energía de un canal a los canales vecinos [21].

## **Curvatura**

El interior de una fibra normalmente se ve como un espejo para los rayos de luz, y ligeras curvaturas en la fibra no introducen pérdidas, estos se producen sólo cuando el radio de la curva hace que el rayo de luz sea incidente en un ángulo

menor que el ángulo crítico [17], generando pérdidas por radiación en la fibra óptica debido a distintas causas externas.

Hay dos tipos de curva que causan pérdidas por efecto de radiación que se producen cuando la fibra óptica es sometida a algún tipo de curvatura durante el tendido o manejo de la misma. La primera se conoce como una **macrocurvatura**. Aquí es donde se guía la luz en una fibra doblada que tiene un radio menor que el radio de curvatura mínimo. La luz golpeará la interfaz núcleo / revestimiento en un ángulo menor o diferente que el ángulo crítico y se perderán en el revestimiento (figura 1.6). Una curva cerrada en una fibra puede causar pérdidas significativas porque se ha excedido el máximo ángulo de reflexión total interna [16, 17], esta puede estar generada por una **compresión**, cuando la fibra óptica es sometida a una fuerza distribuida externa (presión mecánica) en una sección de su superficie causando variaciones en el índice de refracción.

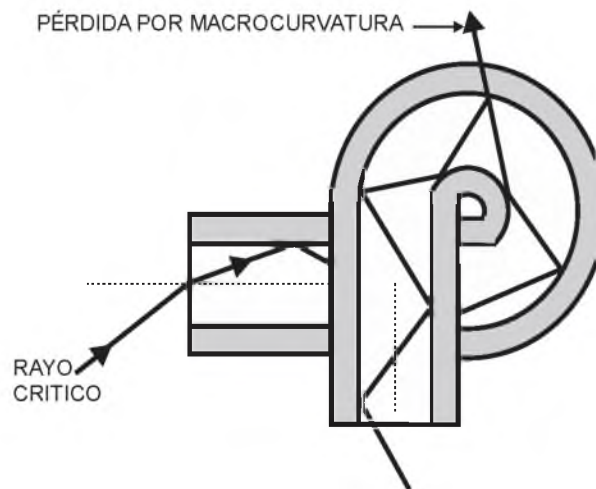


Figura 1.6. Fibra doblada, pérdidas por macrocurvatura.

El segundo tipo de pérdida se conoce como **microcurvado**. El ángulo entre un rayo incidente y la superficie de interfaz núcleo-revestimiento excede el ángulo crítico y por lo tanto la reflexión interna total no se produce en la microcurvatura (figura 1.7), permitiendo que parte del rayo deje el núcleo y entre en el revestimiento.

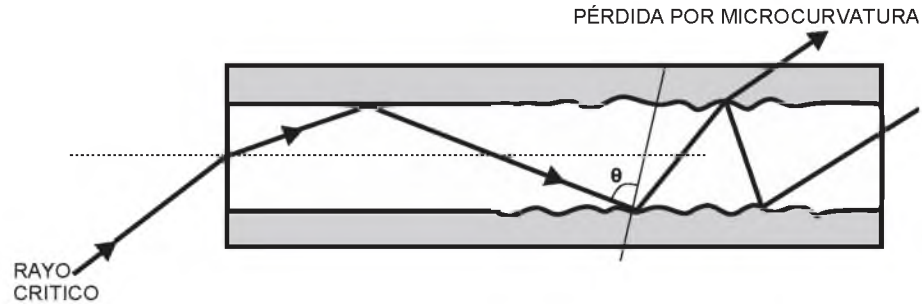


Figura 1.7. Pérdidas debido a una microcurvatura.

La microcurvatura toma la forma de una pequeña curva cerrada (una torcedura o ruptura abrupta) en el cable que es causada por: imperfecciones en el revestimiento; ondulaciones en la interfaz núcleo/revestimiento; daño por **elongación** de la fibra óptica por comportarse como un material elástico hasta que llega al punto de ruptura; pequeñas grietas en la fibra producidas por fuerzas externas (contracción) y debido a la flexión o fuerzas de tracción ejercidas en puntos dispersos a lo largo de la superficie de la fibra.

La flexión o fuerzas de tracción, pueden inducir microcurvaturas en la superficie del núcleo que conducen a pérdidas sustanciales acumuladas y las fuerzas externas pueden ser de un objeto afilado pesado que está colocada a través del cable o el cable siendo apretado. Consecuentemente el microcurvado se emplea en sensores de fibra óptica como un mecanismo de transducción [12, 17].

### Conexiones y empalmes

**La Pérdida de conexión de Fresnel** se da donde el núcleo y el revestimiento se encuentran, incidiendo la luz este límite en un ángulo menor que el ángulo crítico con un 4% de la luz que se refleja de nuevo en el núcleo. Este mismo fenómeno de pérdida es conocido como reflexión de Fresnel y también se

observa cuando dos fibras se unen entre sí como se observa en la figura 1.8, donde a pesar de haber sido unidas con extremos perfectamente planos y lisos, todavía hay un cambio inevitable en los índices de refracción debido a una pequeña cantidad de aire entre las dos fibras. Esto representa efectivamente una pérdida de 4% en nivel de señal en cada interfaz (vidrio a aire y aire a vidrio) por lo tanto, la cantidad total de energía que se pierde es del 8%. Así que cuando evaluamos la pérdida de potencia sobre una conexión, esto representa aproximadamente una pérdida de 0.17 dB por fibra con la interfaz de aire y la pérdida de 0.34 dB por cada unión fibra a fibra [17].

Por otra parte **el tamaño de la fibra y el desajuste de la apertura numérica** pueden también presentarse cuando se requiere conectar fibras de diferentes tamaños y de diferentes fabricantes. Por ejemplo si la fibra de la cual la luz está emanando es mayor que el de la fibra, que está recibiendo la luz, entonces los rayos de luz se escapan fuera, en la periferia de la fibra más grande [17].

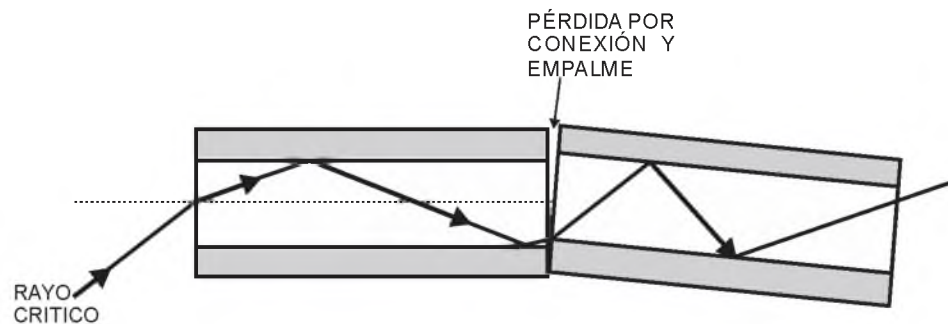


Figura 1.8. Pérdida de conexión de Fresnel.

### Perspectiva general de la atenuación

La atenuación para el estudio de las características de la fibra óptica como medio de transmisión, la representamos en la figura 1.9, cuyo panorama general asume una guía de onda con irregularidades y discontinuidades que altera el

ángulo de incidencia provocando posibles escapes de la luz fuera de la fibra. Tal como puede verse existen una gran cantidad de pérdidas (relación entre la potencia luminosa de salida y entrada de la fibra óptica), si prescindimos de las pérdidas podemos decir que los distintos eventos más comunes que pueden producirse en una fibra son que la potencia de la señal de entrada caiga conforme avanza por el cable, lo cual es inevitable, pero esta caída se acentúa cada vez que aparece un conector o un empalme.

Cuando un rayo meridional (rayo que pasa a través del eje de la fibra) se introduce en la fibra óptica, este al encontrarse dentro del cono es atrapado dentro del núcleo. El rayo continuamente refleja una pequeña parte de la potencia a través del fenómeno de la dispersión espacial de Rayleigh, cuyo reflejo de potencia de retrodispersión (reflexión del rayo en dirección hacia el lugar de donde proviene) también se acopla en la fibra y se propaga en sentido contrario a la señal. Sin embargo continuando con el trayecto del rayo meridional, las pérdidas se continúan presentando, una pequeña fracción de la potencia óptica es radiada por curvatura (macrocurvaturas y microcurvaturas), por conexiones o empalmes y por daños en la fibra óptica (microgrietas, tensión, compresión y elongación). Observando convenientemente que la acción de una fuerza externa, presión mecánica, fuerza longitudinal en un punto, o una fuerza distribuida en una sección de fibra óptica modifica su microestructura interna y afecta su resistencia mecánica determinada por la presión, causando variaciones en la transmisión que depende del índice de refracción, siendo esto adecuado para fabricar sensores basados en fibra óptica ya que la potencia transmitida por una sección de fibra llega a ser proporcional a la perturbación externa que origina la variación de la micro-estructura. De una manera similar, puliendo una parte de la fibra hasta alcanzar el núcleo, se tiene una mayor afectación sobre el rayo para actuar sobre él a nuestro beneficio, lo que es el principio de funcionamiento de los sensores basados en la técnica de plasmones superficiales.

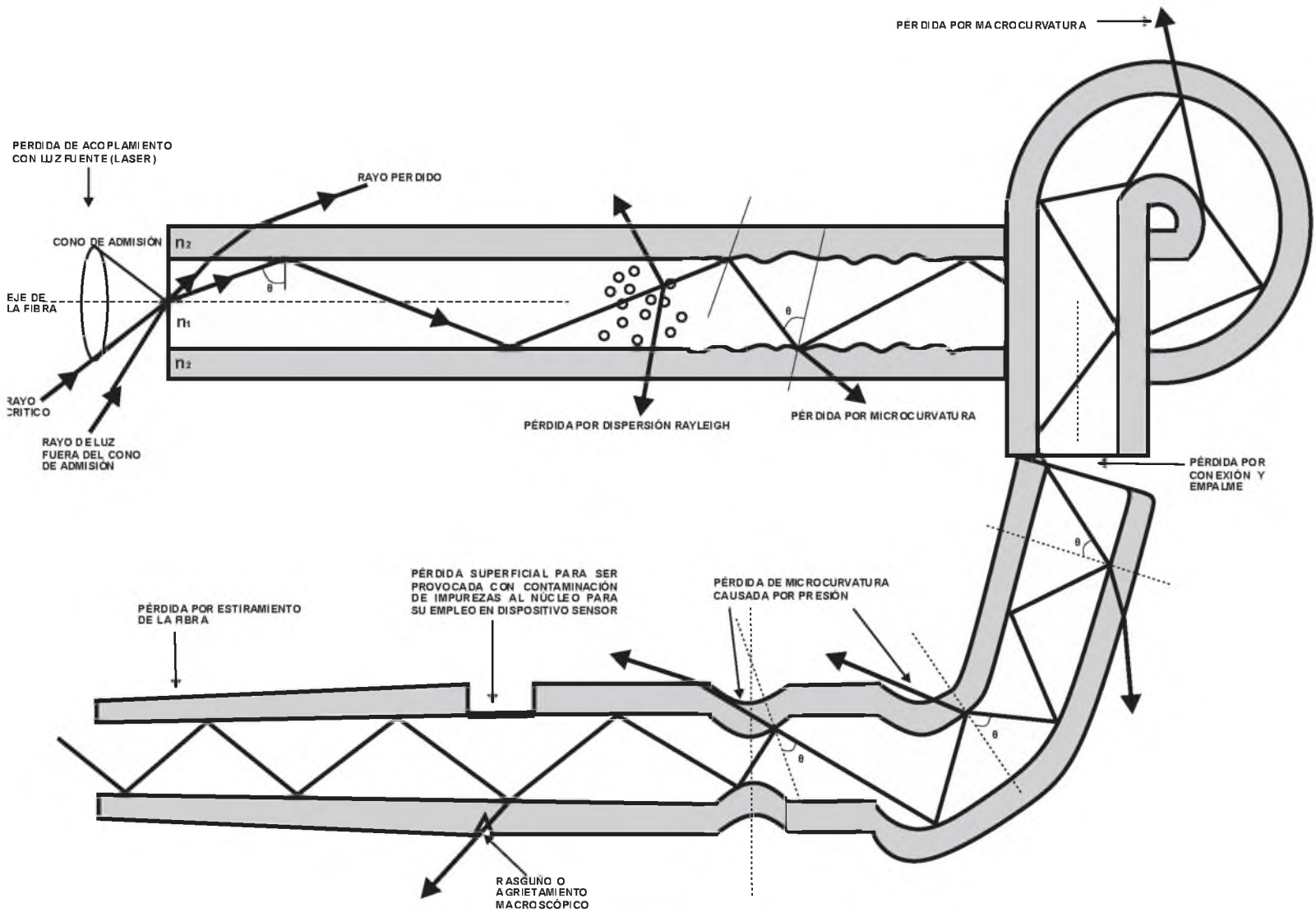


Figura 1.9. Distintas pérdidas que pueden producirse en una fibra óptica.

## CAPÍTULO 2

---

# POLARIZACIÓN E INTERFERENCIA

---

La luz emitida por una fuente está constituida por una serie de trenes de ondas procedentes de átomos distintos; en cada uno de estos trenes de ondas un campo eléctrico oscila en un plano determinado pero, en general, su orientación es distinta de unos a otros. Dado el enorme número de moléculas y átomos de la fuente luminosa, se comprende el gran número de trenes de ondas que constituye un haz de luz y, por consiguiente, la existencia en éste de ondas polarizadas en todas las direcciones transversales posibles [22]. La comprensión de estos fenómenos relacionados con la generación, propagación, interacción, detección y comportamiento de la luz, presentan particular interés donde la polarización del campo electromagnético que se transmite, permite aprovechar con fines específicos la energía asociada.

Igualmente otro de los fenómenos más representativos del comportamiento ondulatorio lo constituye la superposición de ondas que recibe el nombre de interferencia. En la naturaleza no es común encontrar movimientos ondulatorios puros y aislados en el espacio o en los medios materiales, trátase de ondas en el agua, ondas sonoras, ondas de luz, etc. Con frecuencia, las ondas interfieren unas con otras para configurar patrones oscilatorios complejos, normalmente caóticos y difíciles de analizar y de descomponer en sus ondas individuales. Sin embargo, algunos de estos patrones adquieren regularidad y resultan uno de los aspectos más interesantes e importantes de la ingeniería óptica y particularmente interesantes para la observación física. De hecho, la interferencia es fundamental para casi todo lo que hacemos en las comunicaciones de fibra óptica [18].

## 2.1 Estados de polarización

La polarización es una propiedad inherente a las ondas transversales (Anexo I) entre las que se encuentran las luminosas [23], las cuales adquieren una orientación en su campo electromagnético. Sin embargo por comodidad cuando se habla de la polarización de los campos electromagnéticos es para referirse a la dirección del campo eléctrico sin olvidar que este lleva asociado un campo magnético [18]. Así para cada onda electromagnética (luz) existe un plano que contiene la dirección de campo y la dirección de propagación, este plano es conocido como plano de polarización de onda y dependiendo como oscilen, roten y se desplacen los campos (principalmente el vector de campo eléctrico) en el medio es cómo podemos tener luz con polarización lineal, circular y elíptica [24].

Sean dos ondas de luz armónicas dadas por las ecuaciones vectoriales siguientes.

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \hat{\mathbf{i}} E_{0x} \cos(kz - \omega t), \quad (2.1)$$

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \hat{\mathbf{j}} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon). \quad (2.2)$$

Donde  $\varepsilon$  es la diferencia de fase entre las dos ondas viajando en dirección  $z$ ,  $E_{0x}$  y  $E_{0y}$  son sus amplitudes,  $k$  es una constante positiva conocida como el número de onda,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $t$  es el tiempo. Por consiguiente el campo eléctrico asociado a la luz que es la perturbación óptica que resulta de sumar estas dos ondas que son perpendiculares, es.

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{\mathbf{i}} E_{0x} \cos(kz - \omega t) + \hat{\mathbf{j}} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon). \quad (2.3)$$

### 2.1.1 Polarización lineal

La polarización lineal (figura 2.1) se origina cuando  $\epsilon = 0$  o un entero múltiplo de  $2\pi$ , esto quiere decir que las ondas están en fase. Para este caso.

$$\mathbf{E}(z, t) = [\hat{\mathbf{i}} E_{0x} + \hat{\mathbf{j}} E_{0y}] \cos(kz - \omega t). \quad (2.4)$$

La onda resultante tiene una amplitud fija igual a  $[\hat{\mathbf{i}} E_{0x} + \hat{\mathbf{j}} E_{0y}]$  y genera un plano de vibración constante.

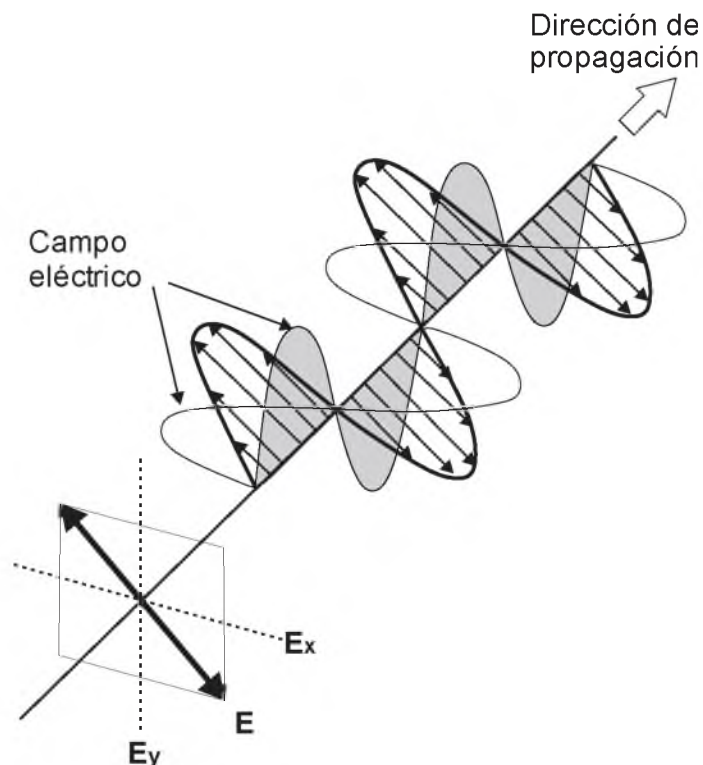


Figura 2.1. Luz polarizada linealmente.

### 2.1.2 Polarización circular

La polarización circular (figura 2.2) se produce cuando la dirección del campo eléctrico gira a través de  $360^\circ$  durante una longitud de onda. Por supuesto, el campo magnético asociado gira con él, cuando las amplitudes de las ondas (ec. 2.1 y 2.2) son iguales ( $E_{0x} + E_{0y} = E_0$ ) y están desfasadas por  $\varepsilon = \pm \frac{\pi}{2}$ , la suma vectorial de las dos ondas resulta ser

$$\mathbf{E}(z, t) = E_0[\hat{\mathbf{i}} \cos(kz - \omega t) \pm \hat{\mathbf{j}} \sin(kz - \omega t)]. \quad (2.5)$$

Donde  $\pm$  determina polarización circular derecha si es  $+$  y polarización circular izquierda si es  $-$ .

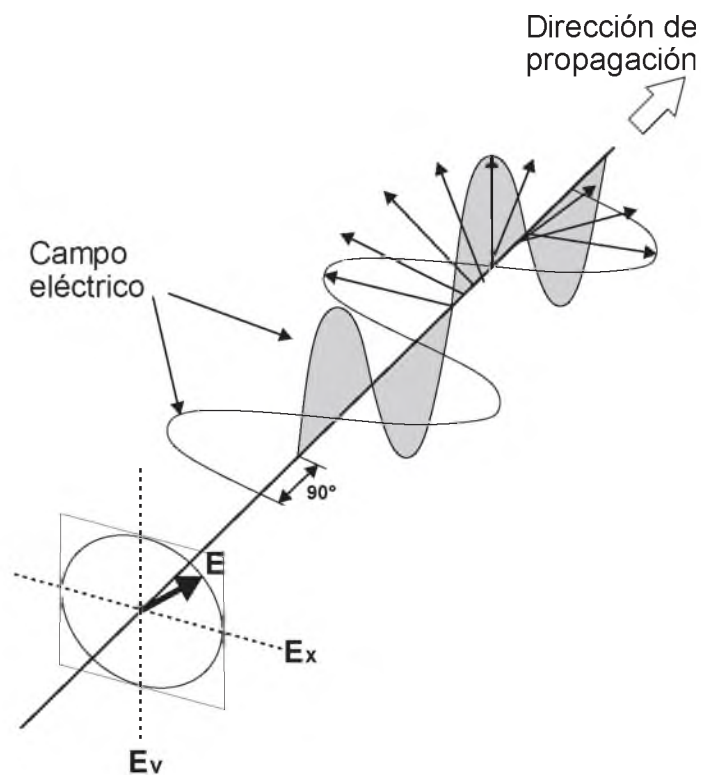


Figura 2.2. Luz polarizada circularmente.

### 2.1.3 Polarización elíptica

La polarización lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica (figura 2.3). Para describirlas se partirá de las ecuaciones (2.1) y (2.2) para eliminar la dependencia del tiempo. De la ecuación (2.2) se tiene

$$\frac{E_y}{E_{0y}} = \cos[(kz - \omega t) + \varepsilon]. \quad (2.6)$$

Usando la identidad trigonométrica  $\cos(u + v) = \cos u \cos v - \sin u \sin v$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} = \cos(kz - \omega t) \cos \varepsilon - \sin(kz - \omega t) \sin \varepsilon. \quad (2.7)$$

Dado que de la ecuación (2.1) se tiene

$$\cos(kz - \omega t) = \frac{E_x}{E_{0x}}. \quad (2.8)$$

Entonces la ecuación (2.7) queda

$$\frac{E_y}{E_{0y}} - \frac{E_x}{E_{0x}} \cos \varepsilon = -\sin(kz - \omega t) \sin \varepsilon. \quad (2.9)$$

Elevando al cuadrado la ecuación (2.1) en ambos miembros

$$E_x^2 = E_{0x}^2 \cos^2(kz - \omega t), \quad (2.10)$$

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} = 1 - \sin^2(kz - \omega t), \quad (2.11)$$

$$\sin(kz - \omega t) = \left[ 1 - \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Ahora también elevando al cuadrado la ecuación (2.9) en ambos miembros

$$\left[ \frac{E_y}{E_{0y}} - \frac{E_x}{E_{0x}} \cos \varepsilon \right]^2 = [-\sin(kz - \omega t) \sin \varepsilon]^2, \quad (2.13)$$

$$\frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_y}{E_{0y}} \frac{E_x}{E_{0x}} \cos \varepsilon + \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} \cos^2 \varepsilon = \left( 1 - \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} \right) \sin^2 \varepsilon, \quad (2.14)$$

$$\frac{E_y^2}{E_{0y}^2} + \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} - 2 \frac{E_y}{E_{0y}} \frac{E_x}{E_{0x}} \cos \varepsilon = \sin^2 \varepsilon. \quad (2.15)$$

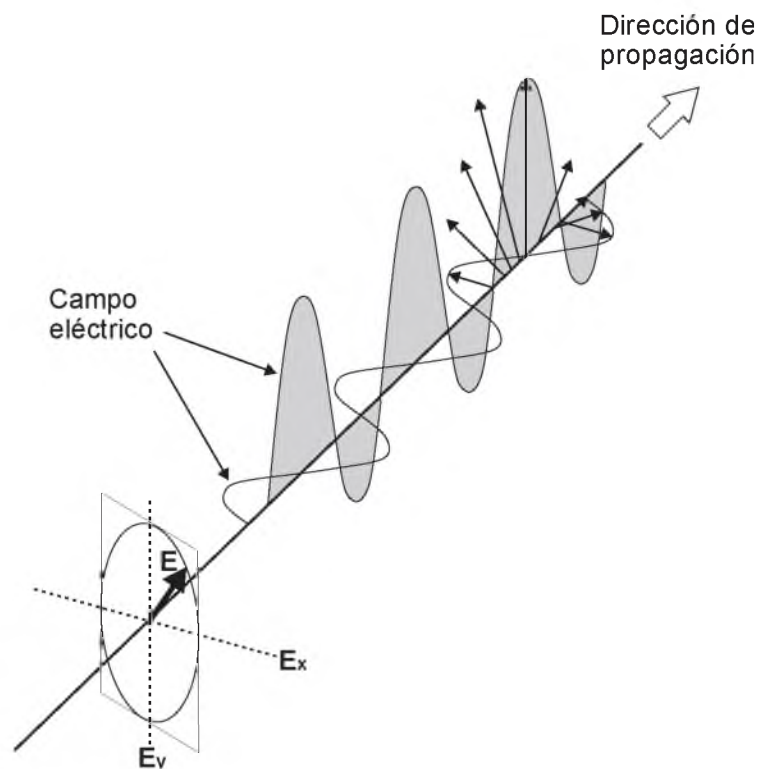


Figura 2.3. Luz polarizada elípticamente.

En conclusión la ecuación (2.15), representa una elipse, cuya excentricidad y orientación de sus ejes en el plano  $xy$  depende solamente de  $\varepsilon$ , pero no de  $t$  [23]. Igualmente que la polarización circular, la polarización elíptica es de dos tipos: izquierda o derecha, de acuerdo a si la elipse que traza el extremo del vector de campo eléctrico gira en sentido antihorario u horario, respectivamente, para un observador hacia el cual se propaga la luz.

Este tema ilustra de forma comprensible el fenómeno de la polarización y permite estudiar la luz láser para entender su propagación en un medio birrefringente (fibra óptica). El control de la polarización es una característica importante para la fabricación de sensores basados en fibra óptica porque es uno de los parámetros que se modifica torciendo, comprimiendo y estirando la fibra. Por ejemplo, si una luz polarizada atraviesa la fibra óptica, el estado de polarización cambia. La medición de este cambio es un camino útil para sensar diferentes efectos.

## 2.2 Interferencia

Todos los días vemos ejemplos de interferencia en el entorno que son observados en cualquier tipo de ondas, como luz, radio, sonido, ondas en la superficie del agua, etc.

Cuando dos o más ondas luminosas con propiedades específicas (amplitud, fase, frecuencia, etc.) se superponen en la misma región del espacio, se determina una perturbación óptica final (resultante). Esta propiedad, denominada principio de superposición sugiere que la perturbación resultante en cualquier punto de un medio es la suma algebraica de sus ondas constitutivas separadas. Esto es consecuencia de que la ecuación de onda es lineal, y por tanto si existen dos o más soluciones, cualquier combinación lineal de ellas será también solución.

Para interferencia permanente, detectable, utilizable y estable, se tienen que cumplir ciertas condiciones [23, 24] que son:

- Las ondas que interfieren deben ser coherentes.
- Las ondas deben tener la misma frecuencia y las amplitudes de los campos deben ser iguales.
- Los campos eléctricos deben ser paralelos o formen entre sí un pequeño ángulo.

### 2.2.1 Superposición de ondas transversales

Sean dos ondas planas ideales de amplitudes  $E_{01}$  y  $E_{02}$  con la misma frecuencia  $\omega$  que se propagan en una misma dirección, siendo sus vectores eléctricos  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$  paralelos entre sí, representado por las ecuaciones.

$$\mathbf{E}_1 = E_{01} \sin(\omega t + \alpha_1), \quad (2.16)$$

$$\mathbf{E}_2 = E_{02} \sin(\omega t + \alpha_2) \quad (2.17)$$

La perturbación resultante es la superposición lineal de estas ondas, que se representa por la suma de  $N$  de ondas semejantes en términos de funciones seno y coseno como:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N E_{0i} \sin(\alpha_i \pm \omega t) \quad (2.18)$$

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N E_{0i} \cos(\alpha_i \pm \omega t) \quad (2.19)$$

Por lo tanto en términos de funciones seno la perturbación resultante de las ecuación (2.16) y (2.17) es

$$\mathbf{E} = E_{01} \sin(\omega t + \alpha_1) + E_{02} \sin(\omega t + \alpha_2) \quad (2.20)$$

Usando la identidad trigonométrica  $\sin(u + v) = \sin u \cos v + \cos u \sin v$

$$\mathbf{E} = E_{01}(\sin \omega t \cos \alpha_1 + \cos \omega t \sin \alpha_1) + E_{02}(\sin \omega t \cos \alpha_2 + \cos \omega t \sin \alpha_2) \quad (2.21)$$

Al separar los términos que dependen del tiempo, se transforma en

$$\mathbf{E} = (E_{01} \cos \alpha_1 + E_{02} \cos \alpha_2) \sin \omega t + (E_{01} \sin \alpha_1 + E_{02} \sin \alpha_2) \cos \omega t \quad (2.22)$$

Ya que los términos entre paréntesis son constantes en el tiempo, entonces;

$$E_0 \cos \alpha = E_{01} \cos \alpha_1 + E_{02} \cos \alpha_2 \quad (2.23)$$

$$E_0 \sin \alpha = E_{01} \sin \alpha_1 + E_{02} \sin \alpha_2 \quad (2.24)$$

Esta sustitución es válida siempre que se pueda resolver  $E_0$  y  $\alpha$ . Para ello, se eleva al cuadrado y se suman las ecuaciones para obtener.

$$E_0^2 = E_{01}^2 + 2E_{01}E_{02}(\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2) + E_{02}^2 \quad (2.25)$$

Usando la identidad trigonométrica  $\cos(u - v) = \cos u \cos v + \sin u \sin v$

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.26)$$

O bien

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \delta \quad (2.27)$$

Donde  $\delta = \alpha_2 - \alpha_1$  es la diferencia de fase entre las dos ondas, así que tiene una intensidad  $E_0^2$  proporcional al cuadrado de la amplitud resultante, que no dependerá, de las amplitudes  $E_{01}$  y  $E_{02}$ , sino de la diferencia de fase  $\delta$  que en cada punto tenga las dos ondas [23]. Igualmente se podría obtener el mismo resultado tanto para N ondas en términos de funciones coseno. Por lo que de manera general para N ondas la ecuación (2.27) queda representada.

$$E_0^2 = \sum_{i=1}^N E_{0i}^2 + 2 \sum_{j>i}^N \sum_{i=1}^N E_{0i}E_{0j} \cos(\alpha_i - \alpha_j) \quad (2.28)$$

Y dado que la entidad trigonométrica  $\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$ . Entonces se divide la ecuación (2.23) por (2.24) para tener.

$$\tan \alpha = \frac{E_{01} \sin \alpha_1 + E_{02} \sin \alpha_2}{E_{01} \cos \alpha_1 + E_{02} \cos \alpha_2} \quad (2.29)$$

Asimismo de manera general

$$\tan \alpha = \frac{\sum_{i=1}^N E_{0i} \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^N E_{0i} \cos \alpha_i} \quad (2.30)$$

Ahora que las ecuaciones (2.23) y (2.24) es validad ya que los términos  $E_0$  y  $\alpha$  se satisfacen. Entonces la perturbación total (ecuación 2.22) queda como

$$\mathbf{E} = E_0(\sin \alpha \cos \omega t + \cos \alpha \sin \omega t) \quad (2.31)$$

Usando la identidad trigonométrica  $\sin(u + v) = \sin u \cos v + \cos u \sin v$  quedará

$$\mathbf{E} = E_0 \sin(\alpha + \omega t) \quad (2.32)$$

Que es una onda compuesta armónica por ser resultado de las superposición de las ondas sinusoidales  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$ , teniendo la misma frecuencia que estas ondas aunque su amplitud y fase sean diferentes. De la ecuación (2.27) para  $E_{01} = E_{02} = \mathbf{E}$  se tiene que

$$E_0^2 = 2\mathbf{E}^2(1 + \cos \delta) \quad (2.33)$$

Y usando la identidad trigonométrica  $(1 + \cos \delta) = 2\cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$  por lo quedará

$$E_0^2 = 4\mathbf{E}^2 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.34)$$

Donde la amplitud resultante, y por lo tanto la intensidad  $E_0^2$ , será máxima en aquellos puntos en los que existe concordancia de fase  $\delta = 2K\pi$ ,  $K = 0, 1, 2 \dots$ . Igualmente se cumple para el término de interferencia  $2E_{01}E_{02}\cos(\alpha_2 - \alpha_1)$  de la ecuación (2.27). El factor decisivo es la diferencia en fase entre las dos componentes  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$ ,  $\delta \equiv \alpha_2 - \alpha_1$ . Cuando  $\delta = \pm 2K\pi$ ,  $K = 0, 1, 2 \dots$  para una

amplitud resultante con un valor máximo mientras que será nula o valor mínimo donde exista oposición de fase es decir donde  $\delta = \pm(2K + 1)\pi$ ,  $K = 0, 1, 2 \dots$  tal y como se muestra en la figura 2.4.

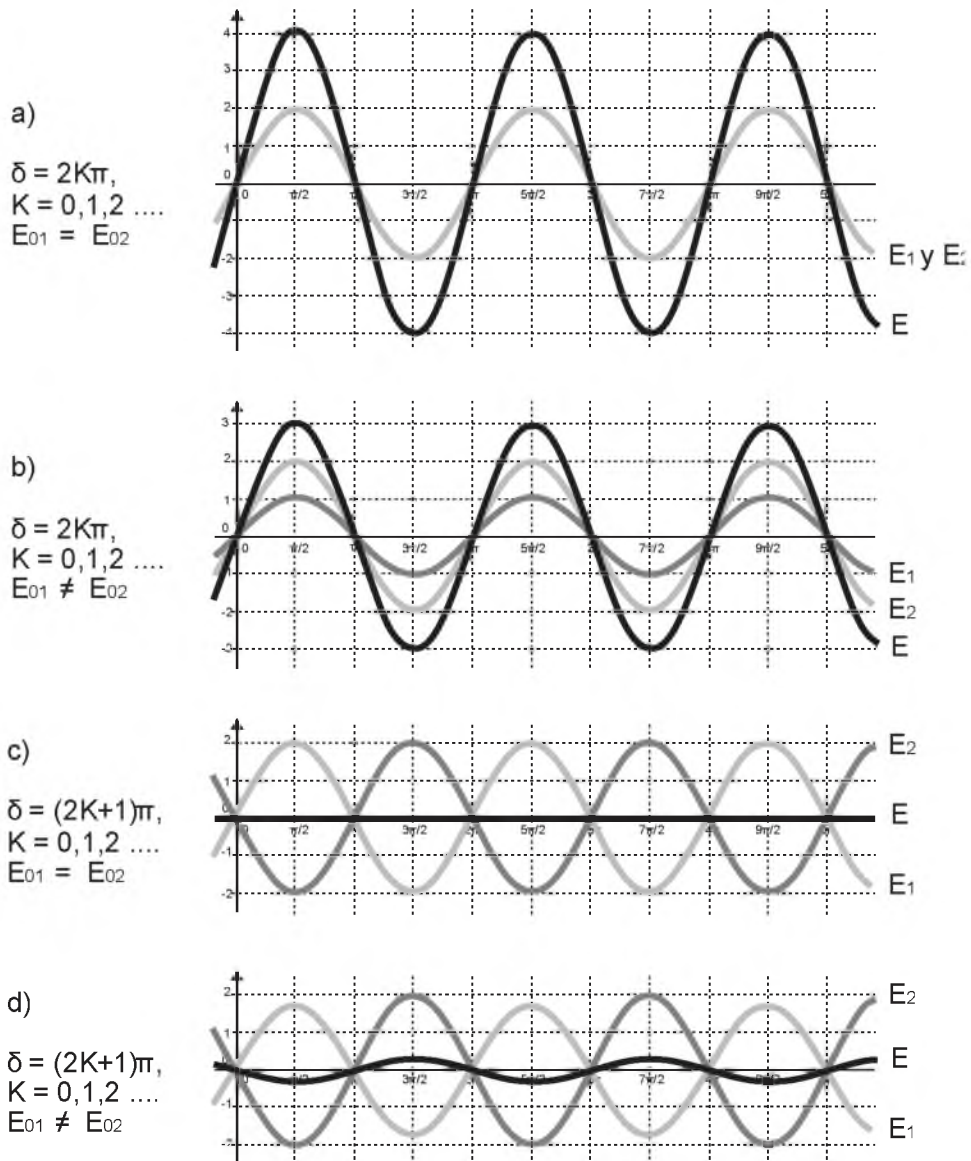


Figura 2.4. a) y b) Las ondas están en fase, cresta sobre cresta. c) y d) Las ondas están desfasadas en  $180^\circ$  y los valles se superponen a las crestas.

Lo anterior resulta importante para cualquier análisis intuitivo de la interferencia, puesto que se sabe que la luz es un fenómeno vectorial y los campos eléctricos y magnéticos son campos vectoriales. Sin embargo la perturbación óptica, o campo luminoso, varía en el tiempo a una velocidad muy rápida resultando poco práctica de detectar, por lo que es mejor plantear el estudio de la interferencia recurriendo a la irradiancia que es una medida de la concentración de potencia. De manera similar en este contexto la interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes.

Su análisis se simplifica al considerar dos fuentes puntuales  $S_1$  y  $S_2$  monocromáticas de la misma frecuencia, propagándose en un medio homogéneo, y observadas en un punto P muy distante de las fuentes a una distancia donde los frentes de onda son planos (figura 2.5).

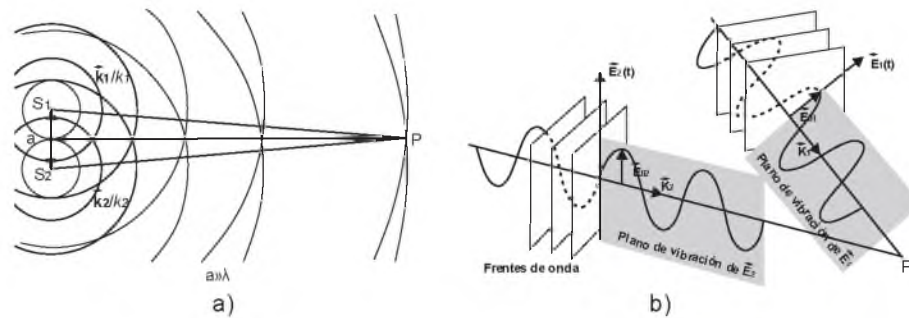


Figura 2.5. Ondas de dos fuentes puntuales superpuestas espacialmente.

Resumiendo. De dos ondas cuya forma seria.

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \tag{2.35}$$

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2) \tag{2.36}$$

La irradiancia en P (ver figura 2.5).

$$I = \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}^2 \rangle_T \simeq \langle \mathbf{E}^2 \rangle_T \quad (2.37)$$

En este caso

$$\mathbf{E}^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \quad (2.38)$$

Considerando que

$$\langle f(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t') dt' \quad (2.39)$$

Manipulando estas ecuaciones se obtiene la irradiancia total

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.40)$$

Las irradiancias máxima y mínima se obtienen cuando  $\cos \delta = \pm 1$ , respectivamente.

$$\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots \Rightarrow I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{Interferencia constructiva total}$$

$$\delta = \pm \pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots \Rightarrow I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{Interferencia destructiva total}$$

Si  $E_{01} = E_{02} \Rightarrow I_1 = I_2 = I_0$ , por lo que:

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.41)$$

Para ondas esféricas emitidas desde  $S_1$  y  $S_2$ :

$$\mathbf{E}_1(r_1, t) = \mathbf{E}_{01}(r_1) \exp [i(k_{r1} - \omega t + \varepsilon_1)] \quad (2.42)$$

$$\mathbf{E}_2(r_2, t) = \mathbf{E}_{02}(r_2) \exp [i(k_{r2} - \omega t + \varepsilon_2)] \quad (2.43)$$

Siendo ahora:

$$I_{\max} \Rightarrow (r_1 - r_2) = \frac{2\pi m}{k} = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$I_{\min} \Rightarrow (r_1 - r_2) = \frac{\pi m'}{k} = \frac{1}{2} m' \lambda, \quad m' = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$$

En conclusión, este tema permite entender la interferencia entre dos haces, cuyo principio sirve para asimilar la interferometría basada en fibra óptica. En el desarrollo del presente trabajo experimental se cuenta con un elemento fundamental para el montaje del interferómetro, el acoplador de fibra que es un dispositivo capaz de dividir y hacer interferir un haz de luz, y cuyo principio de operación está relacionado con la interferencia constructiva o destructiva, que origina un cambio de intensidad de luz de salida dependiendo de las características de los haces al momento de interferir. Esto es de utilidad para diferentes aplicaciones como se verá más adelante.

## CAPÍTULO 3

---

# INTERFERÓMETRO DE SAGNAC DE FIBRA ÓPTICA

---

El interferómetro de Sagnac de fibra óptica a bajas potencias es llamado espejo de lazo óptico de fibra (FOLM, Fiber Optical Loop Mirror) mientras que a altas potencias recibe el nombre de espejo de lazo óptico no lineal (NOLM, Nonlinear Optical Loop Mirror) [25].

Este interferómetro presenta una configuración muy compacta, fácil de transportar y flexible. Tiene ciertas ventajas funcionales que le permiten competir satisfactoriamente con otros dispositivos de fibra óptica con funciones similares, como las de una respuesta relativamente rápida (dependiendo ésta de los aparatos de monitoreo y no del esquema mismo), poseer pérdidas más bajas que cualquier otro esquema interferométrico formado con fibra óptica [26], tener gran estabilidad y ser insensible (no afectado) a perturbaciones externas como a frecuencias eléctricas [26, 27]. Es bien conocida su alta sensibilidad a los cambios de temperatura y de presión cuando se usa un tipo de fibra óptica en la cual los esfuerzos laterales internos son fuertes [28]. Una de sus características es que dos haces se propagan por el mismo camino óptico (lazo) que lo hace más robusto a cambios ambientales que otros esquemas interferométricos [2]. El interferómetro de Sagnac de fibra óptica también tiene la ventaja de eliminar fluctuaciones térmicas y mecánicas las cuales afectan por igual a las ondas contrapropagantes, asegurar longitudes de recorridos iguales y combinar potencias ópticas iguales en un acoplador a fibra [29]. También ha demostrado su enorme potencialidad en sistemas de comunicación [30] y sus propiedades no lineales lo hacen útil para láseres de pulsos cortos, procesamientos de señales, etc [31]. Además, este arreglo puede llegar a ser un dispositivo de apoyo a aplicación de otras configuraciones más complejas [26].

### 3.1 Antecedente del interferómetro de Sagnac de fibra óptica

Como antecedente de interferómetro de Sagnac de fibra está el interferómetro de Sagnac de espejos. Este tipo de interferómetro fue en primer lugar descrito por Michelson pero se asocia más comúnmente con Sagnac, quien llevó a cabo una extensa serie de experimentos con él [32], como la demostración óptica de la detección de la rotación absoluta con luz en 1913 [33], mientras estaba observando el efecto del movimiento relativo del éter. Sagnac demostró que es posible detectar la rotación con respecto al espacio inercial con un sistema óptico que no tiene ninguna parte móvil. La primera predicción del efecto Sagnac, y la posibilidad de detectar la rotación de la tierra con un interferómetro de kilómetros de área, fue por Lodge (1893, 1897) [34].

El interferómetro de Sagnac de espejo es bastante estable y muy fácil de alinear dado que las trayectorias ópticas de los dos haces son siempre casi igual, incluso con una fuente de banda ancha extendida [24, 32]. La característica principal de este dispositivo es que los haces toman dos caminos idénticos pero opuestos en dirección y que ambos forman caminos cerrados antes de que se unan para producir la interferencia. Parte de la onda que incide en el divisor de haz se refleja y parte se transmite con amplitudes más bajas que el haz original. Un pequeño desplazamiento deliberado en la orientación de uno de los espejos producirá una diferencia en el camino óptico obteniéndose una distribución de franjas. Puestos que los haces están superpuestos y por lo tanto son inseparables, el interferómetro no puede emplearse en las aplicaciones convencionales que, por lo general, dependen de la posibilidad de imponer variaciones sobre únicamente uno de los haces constitutivos [24].

El interferómetro de Sagnac de espejos se muestra en la figura 3.1a, con un número par de reflexiones en cada trayectoria y 3.1b, con un número impar de reflexiones. Otras formas también son posibles.

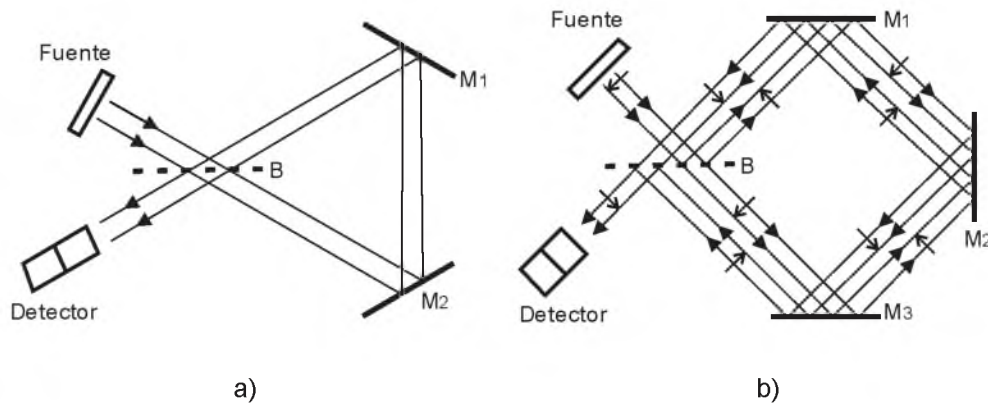


Figura 3.1. Dos formas del interferómetro de Sagnac.

Una diferencia importante entre las dos formas es que en la que se muestra en la figura 3.1b, los frentes de onda se invierten lateralmente con respecto a la otra dentro del interferómetro. Como resultado, los caminos recorridos por los dos haces dentro del interferómetro se pueden separar físicamente por un desplazamiento lateral del haz incidente. Por otro lado, en la forma mostrada en la figura 3.1a, los dos haces siempre se superponen en el mismo sentido [32].

Esta configuración original del interferómetro de Sagnac de espejos fue muy lejos al formar un práctico sensor de velocidad angular, pero con una sensibilidad muy limitada. Sin embargo con la invención de la fibra óptica de baja pérdida, fuentes y detectores de luz de semiconductores de estado sólido, V. Vali y RW Shorthill [35] demostraron el primer trabajo que empleó fibra óptica para guiar la luz y formar un interferómetro de Sagnac como giroscopio de fibra óptica interferométrico en 1976. Posteriormente se realizaron análisis encaminados a tratar de reducir el número de fuentes de error del giroscopio de fibra óptica, con lo cual aparecen nuevas propuestas de arreglo realizados completamente con fibra óptica, se descubren nuevos efectos, nuevas líneas de investigación y aplicaciones, en sensores expandiéndose hasta comunicaciones.

### 3.2 Principios de operación del interferómetro de Sagnac de fibra óptica de acuerdo a las fases

El interferómetro de Sagnac de fibra óptica convencional se muestra en la figura 3.2. Está formado por un acoplador direccional de fibra de cuatro puertos con una porción de potencia dividida de  $\alpha/(1 - \alpha)$  ( $\alpha$  es la constante de acoplamiento) y dos de estos puertos unidos por un lazo de fibra. Si se incide un haz de luz  $I_i$  a la entrada del puerto 1 del acoplador, este haz tendrá un campo eléctrico  $E_i$  con una fase  $\Phi_{in}$ , debido a las propiedades del acoplador se tiene dos haces a la salida de los puertos 3 y 4. Para el puerto 3 se tiene una intensidad  $I_3 = \alpha I_i$  con un campo  $E_3$  y una fase  $\phi_3 = \phi_{in}$ , para el puerto 4 se tendrá también una intensidad dada por  $I_4 = (1 - \alpha)I_i$  con un campo eléctrico  $E_4$  y una fase  $\phi_4 = \phi_{in} + \pi/2$ . Este cambio de fase de  $\pi/2$  es debido a las propiedades del acoplador.

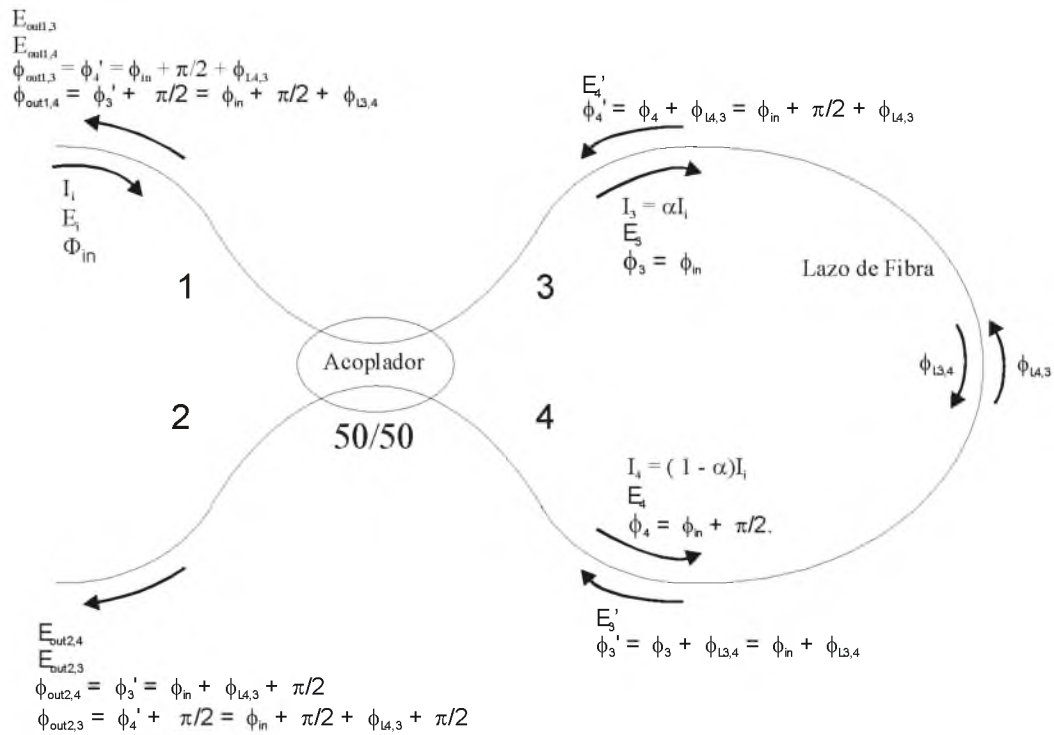


Figura 3.2. Interferómetro de Sagnac de fibra óptica.

Como los puertos 3 y 4 forman un lazo cerrado, se tiene dos haces que viajan en direcciones opuestas, uno del puerto 3 al puerto 4 con un campo eléctrico que denotado como  $E_3'$  con fase  $\phi_3'$  y otro que va del puerto 4 al puerto 3 con un campo  $E_4'$  y fase  $\phi_4'$ , estos dos campos sufren durante su viaje dentro del lazo un cambio de fase lineal denotado como  $\phi_L$ . Así el campo que entra al puerto 3 es  $E_4'$  y tiene fase  $\phi_4' = \phi_4 + \phi_{L4,3} = \phi_{in} + \pi/2 + \phi_{L4,3}$ , donde  $\phi_{L4,3}$  es el cambio de fase lineal del puerto 4 al puerto 3, y un campo  $E_3'$  que entra al puerto 4 con fase  $\phi_3' = \phi_3 + \phi_{L3,4} = \phi_{in} + \phi_{L3,4}$ , donde  $\phi_{L3,4}$  es el cambio de fase lineal del puerto 3 al puerto 4.

De todo esto y observando la figura 3.2, a la salida del puerto 1 están dos campos, uno debido al campo que entra al puerto 3 que es llamado  $E_{out1,3}$  y otro debido al campo que entra al puerto 4 que es llamado  $E_{out1,4}$ , debido a las propiedades del acoplador las fases de estos campos serán, para  $E_{out1,3}$   $\phi_{out1,3} = \phi_4' = \phi_{in} + \pi/2 + \phi_{L4,3}$  y la fase de  $E_{out1,4}$  será  $\phi_{out1,4} = \phi_3' + \pi/2 = \phi_{in} + \pi/2 + \phi_{L3,4}$ , a la salida del puerto 1 se tiene un campo reflejado que es llamado  $E_r$ , el haz de salida es llamado  $I_r$ . Si el cambio de fase lineal dentro del lazo de fibra es el mismo se tendrá interferencia constructiva, esto es,  $\phi_{L3,4} = \phi_{L4,3}$  ambos,  $E_{out1,4}$  y  $E_{out1,3}$  tienen la misma fase y por lo tanto  $E_r = E_{out1,4} + E_{out1,3}$ .

Para el puerto 2 pasa algo similar, ahora denotando como  $E_{out2,3}$  al campo que sale por el puerto 2 debido al campo  $E_4'$  y como  $E_{out2,4}$  al campo que sale por el puerto 2 debido a  $E_3'$ . Así, por las propiedades del acoplador la fase de  $E_{out2,3}$  será  $\phi_{out2,3} = \phi_4' + \pi/2 = \phi_{in} + \pi/2 + \phi_{L4,3} + \pi/2$  y la fase de  $E_{out2,4}$  será  $\phi_{out2,4} = \phi_3' = \phi_{in} + \phi_{L3,4}$ , teniendo por lo tanto a la salida del puerto 2 un haz transmitido  $I_t$  y un campo también transmitido  $E_t$ . Si el cambio de fase lineal en el lazo de fibra es el mismo  $\phi_{L3,4} = \phi_{L4,3}$ ,  $E_{out2,4}$  y  $E_{out2,3}$  tendrán una diferencia de fase de  $\pi$ , entonces la transmitividad es mínima (interferencia destructiva) por lo que el campo total a la salida del puerto 2 es igual a  $E_t = E_{out2,4} - E_{out2,3}$ .

Si se incide un haz de luz en la entrada del puerto 1 del acoplador, la suma de las intensidades de salida en los puertos 3 y 4 será igual a la intensidad de entrada, la constante de acoplamiento  $\alpha$  solo influye en las amplitudes de los campos y no en su fase. Si  $\alpha = 0.5$ , las amplitudes de los campos a la salida de los puertos 3 y 4 serán iguales, así como también las amplitudes de los campos que salen por los puertos 1 y 2. Recapitulando, la reflectividad es la suma de las amplitudes de los campos que salen por el puerto 1 y la transmitividad es la resta de las amplitudes de estos campos, la transmitividad es entonces cero y la reflectividad se asume como 1, en este caso el interferómetro de Sagnac de fibra se comporta como espejo. Si  $\alpha \neq 0.5$  la reflectividad y la transmitividad tendrán diferentes valores.

### 3.3 Operación del interferómetro de Sagnac de fibra óptica en la región lineal

Este análisis determina la respuesta del interferómetro de Sagnac de fibra en la región lineal tomando la función de transferencia de un acoplador de fibra de cuatro puertos [27, 30, 36].

En la práctica, al hacer incidir un haz de luz por el puerto de entrada 1, su campo estará representado por la siguiente ecuación:

$$E_1 = x E_x + y E_y. \quad (3.1)$$

Donde  $x$  y  $y$  son los vectores unitarios correspondientes a los ejes de referencia  $x$  y  $y$  de la fibra, respectivamente.  $E_x$  y  $E_y$  son las componentes ortogonales de polarización del campo incidente expresado por:

$$E_x = E_1 \cos \theta, \quad (3.2)$$

$$E_y = E_1 \sin \theta. \quad (3.3)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo con respecto al eje rápido de la fibra (entre el eje de polarización del campo incidente y el eje x). Por lo tanto el campo de entrada linealmente polarizado, considerado en la ecuación 3.1 es.

$$E_1 = (\mathbf{x} \cos \theta + \mathbf{y} \sin \theta)E_1. \quad (3.4)$$

De acuerdo a las amplitudes de los campos de entrada  $E_1$  y  $E_2$  en los puertos 1 y 2 respectivamente estudiados por un análisis de modos acoplados [5], se tienen las amplitudes de los campos de salida  $E_3$  y  $E_4$  en los puertos 3 y 4 respectivamente.

$$E_3 = \alpha^{1/2}E_1 + i(1 - \alpha)^{1/2}E_2, \quad (3.5)$$

$$E_4 = i(1 - \alpha)^{1/2}E_1 + \alpha^{1/2}E_2. \quad (3.6)$$

Donde  $\alpha$  es la constante de acoplamiento, y para una sola entrada  $E_1$  (ecuación 3.4) cuando  $E_2 = 0$ . El acoplador divide la amplitud de  $E_1$  en dos señales, una de las cuales continúa propagándose en la misma fibra por la que entró  $E_1$ , mientras que la otra señal se transmitirá por la segunda fibra del acoplador. La amplitud de los campos depende de la razón de acoplamiento  $\alpha$  y  $1 - \alpha$ , respectivamente, por lo tanto con una polarización arbitraria del haz que entra  $E_1$  sea polarización lineal como este caso u otra, los campos de salida pueden ser representado como:

$$E_3 = \alpha^{1/2}E_1, \quad (3.7)$$

$$E_4 = i(1 - \alpha)^{1/2}E_1, \quad (3.8)$$

$E_4$  adquiere un cambio de fase de  $\pi/2$  representado por  $i$ . Conforme  $E_3$  y  $E_4$  se propagan a lo largo de las fibras que forman el lazo, su fase cambia, pero no en la misma proporción debido a que las constantes de propagación son diferentes. Las características, tanto de la fibra como de la señal de entrada, se seleccionan de modo que la fase no se vea afectada por la presencia de efectos no lineales. Los campos de salida después de propagarse a través del lazo de fibra de longitud  $L$ , son dadas en ausencia de pérdidas por,

$$E_{3'} = \alpha^{1/2} E_1 \exp i [\phi_{L3,4}], \quad (3.9)$$

$$E_{4'} = i(1 - \alpha)^{1/2} E_1 \exp i [\phi_{L4,3}]. \quad (3.10)$$

Donde  $\phi_{L3,4}$  y  $\phi_{L4,3}$  Son los cambios de fase lineal que existen dentro de lazo de fibra. Estos cambios de fase lineal están dados por.

$$\phi_{L3,4} = \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \right] L n_{3,4}, \quad (3.11)$$

$$\phi_{L4,3} = \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \right] L n_{4,3}, \quad (3.12)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del haz incidente y  $n_{3,4}$ ,  $n_{4,3}$  son los índices de refracción que tienen los haces en la fibra del puerto 3 al puerto 4 y del puerto 4 al puerto 3 respectivamente.

Para obtener el campo reflejado se tiene que sumar los dos campos que salen de puerto 1, esto se hace utilizando las ecuaciones (3.5) y (3.6), pero ahora en lugar de  $E_1$  y  $E_2$  se pone los campos que entran por los puertos 3 y 4, o sea  $E_{4'}$  y  $E_{3'}$ , es decir,

$$E_r = \alpha^{1/2} E_{4'} + i(1 - \alpha)^{1/2} E_{3'}. \quad (3.13)$$

Sustituyendo  $E_{4'}$  y  $E_{3'}$ ,

$$E_r = \alpha^{1/2}i(1 - \alpha)^{1/2}E_1 \exp i[\phi_{L4,3}] + i(1 - \alpha)^{1/2} \alpha^{1/2}E_1 \exp i[\phi_{L3,4}]. \quad (3.14)$$

De manera semejante se obtiene el campo transmitido,

$$E_t = i(1 - \alpha)^{1/2}E_{4'} + \alpha^{1/2}E_{3'}. \quad (3.15)$$

Sustituyendo  $E_{4'}$  y  $E_{3'}$ ,

$$E_t = i(1 - \alpha)^{1/2} i(1 - \alpha)^{1/2}E_1 \exp i[\phi_{L4,3}] + \alpha^{1/2} \alpha^{1/2}E_1 \exp i[\phi_{L3,4}]. \quad (3.16)$$

Como la intensidad está dada por  $I = K|E|^2$ , donde  $K$  es una constante que depende de las unidades que se estén utilizando, entonces las intensidades reflejada y transmitida son,

$$I_r = K|i \alpha^{1/2}(1 - \alpha)^{1/2}E_1 \{\exp i[\phi_{L4,3}] + \exp i[\phi_{L3,4}]\}|^2, \quad (3.17)$$

$$I_t = K|E_1 \{\alpha (\exp i[\phi_{L4,3}] + \exp i[\phi_{L3,4}]) - \exp i[\phi_{L4,3}]\}|^2. \quad (3.18)$$

Si  $\phi_{L3,4} = \phi_{L4,3}$  y considerando que  $|\exp[i\theta]|^2 = 1$ , entonces las ecuaciones (3.17) y (3.18) se transforman en,

$$I_r = 4K\alpha(1 - \alpha)|E_1|^2, \quad (3.19)$$

$$I_t = (4\alpha^2 - 4\alpha + 1)K|E_1|^2 = (K|E_1|^2 - I_r). \quad (3.20)$$

Como  $I_i = K|E_1|^2$ , entonces las ecuaciones (3.19) y (3.20) se transforman en,

$$I_r = 4\alpha(1 - \alpha)I_i, \quad (3.21)$$

$$I_t = (I_i - I_r). \quad (3.22)$$

Con esto, la reflectividad  $R = I_r/I_i$  esta dada por,

$$R = 4\alpha(1 - \alpha), \quad (3.23)$$

y la transmitividad  $T = I_t/I_i$  esta dada por,

$$T = 4\alpha(\alpha - 1) + 1. \quad (3.24)$$

### 3.4 Matriz de Jones del interferómetro de Sagnac de fibra

En 1988 D. B. Mortimore [37], realiza los primeros análisis formales del interferómetro de Sagnac mostrado en la figura 3.3, formado completamente por fibra óptica y encaminada a aplicaciones diferentes a los giroscopios.

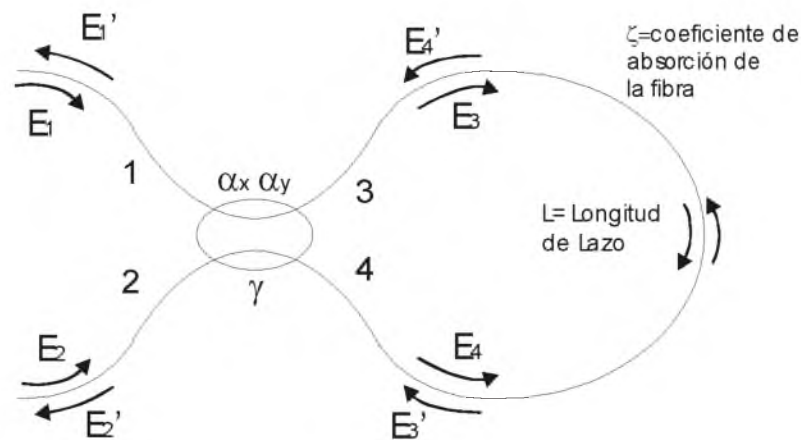


Figura 3.3. Campos de entrada y salida en el interferómetro.

En su trabajo, Mortimore realiza un análisis matricial de dicho arreglo interferométrico, describe un modelo en ecuaciones generales en términos matriciales para los campos de entrada y salida que gobiernan el comportamiento de este interferómetro, considerando en su análisis que la fibra contiene dos

modos de propagación y que los efectos de la polarización de la luz de uno o varios dispositivos pueden describirse en términos de una matriz (matriz de Jones) y el modelo que describe el comportamiento de dicho dispositivo puede relacionar sus entradas y salidas con esta matriz, se tiene lo siguiente.

De la figura 3.3,  $E_1, E_2, E_1'$  y  $E_2'$  son los campos de entrada y de salida de interferómetro según se muestra. Cada uno de estos campos tiene tanto componente  $x$  como componente  $y$ .

Mortimore llega a la siguiente matriz de campos eléctricos de salida del interferómetro,

$$\begin{pmatrix} E_{1x}' \\ E_{1y}' \\ E_{2x}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} a & e & c & h \\ e & b & g & d \\ c & g & a & f \\ h & d & f & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{2x} \\ E_{2y} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

donde

$$\begin{aligned} a &= -2j(1 - \alpha_x)^{1/2} \alpha_x^{1/2} J_{xx}, \\ b &= 2j(1 - \alpha_y)^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{yy}, \\ c &= (2\alpha_x - 1) J_{xx}, \\ d &= (1 - 2\alpha_y) J_{yy}, \\ e &= j \left[ \alpha_x^{1/2} (1 - \alpha_y)^{1/2} J_{xy} - (1 - \alpha_x)^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{yx} \right], \\ f &= j \left[ \alpha_y^{1/2} (1 - \alpha_x)^{1/2} J_{xy} - (1 - \alpha_y)^{1/2} \alpha_x^{1/2} J_{yx} \right], \\ g &= (1 - \alpha_x)^{1/2} (1 - \alpha_y)^{1/2} J_{xy} + \alpha_x^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{yx}, \\ h &= - \left[ \alpha_x^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{xy} + (1 - \alpha_x)^{1/2} (1 - \alpha_y)^{1/2} J_{yx} \right], \end{aligned} \quad (3.26)$$

$J_{ij}$  (con  $i = x, j = y$ ), es la matriz de Jones que nos da la información acerca del lazo de fibra de baja birrefringencia del interferómetro,  $\gamma$  representa las

pérdidas del acoplador,  $\zeta$  es el coeficiente de absorción de la fibra,  $L$  es la longitud del brazo de fibra,  $\alpha_x$  y  $\alpha_y$  son los coeficientes de acoplamiento de las componentes  $x$  y  $y$  respectivamente.

Reduciendo la ecuación (3.25),

$$\begin{pmatrix} E_{1x}' \\ E_{1y}' \\ E_{2x}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{2x} \\ E_{2y} \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

Donde  $\begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix}$  contiene la información completa del lazo de fibra del interferómetro y del acoplador direccional y donde  $J_{11} = \begin{pmatrix} a & e \\ e & b \end{pmatrix}$ ,  $J_{12} = \begin{pmatrix} c & g \\ h & d \end{pmatrix}$ ,  $J_{21} = \begin{pmatrix} c & h \\ g & d \end{pmatrix}$  y  $J_{22} = \begin{pmatrix} a & f \\ f & b \end{pmatrix}$ .

De la figura 3.3 se observa que para los campos de entrada y salida,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_1'$  y  $E_2'$  la ecuación (3.27) queda de la forma,

$$\begin{pmatrix} E_1' \\ E_2' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

Las submatrices  $J_{pq}$  de orden  $2 \times 2$ , representa las características de reflexión y transmisión del lazo de fibra  $J_{qq}$  representa la reflexión del puerto  $q$  al puerto  $q$  y  $J_{pq}$  describe la transmisión del puerto  $p$  al puerto  $q$ .

Al introducir un haz de luz solo por la entrada del puerto 1 y por el puerto 2 se detecta la salida, la ecuación (3.28) queda de la forma,

$$\begin{pmatrix} E_1' \\ E_2' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.29)$$

Entonces para el campo reflejado  $E'_1$  se tiene,

$$\begin{pmatrix} E_{1x}' \\ E_{1y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L}(J_{11}) \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

Sustituyendo  $J_{11}$ ,

$$\begin{pmatrix} E_{1x}' \\ E_{1y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} a & e \\ e & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}, \quad (3.31)$$

sustituyendo  $a$ ,  $b$ , y  $e$  se tiene,

$$\begin{pmatrix} E_{1x}' \\ E_{1y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} -2j(1 - \alpha_x)^{1/2} \alpha_x^{1/2} J_{xx} & j \left[ \alpha_x^{1/2}(1 - \alpha_y)^{1/2} J_{xy} - (1 - \alpha_x)^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{yx} \right] \\ j \left[ \alpha_x^{1/2}(1 - \alpha_y)^{1/2} J_{xy} - (1 - \alpha_x)^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{yx} \right] & 2j(1 - \alpha_y)^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}. \quad (3.32)$$

El campo transmitido es,

$$\begin{pmatrix} E_{2x}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L}(J_{12}) \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}, \quad (3.33)$$

sustituyendo  $J_{12}$  se tiene,

$$\begin{pmatrix} E_{2x}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} c & g \\ h & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}, \quad (3.34)$$

sustituyendo  $c$ ,  $g$ ,  $h$  y  $d$  se tiene,

$$\begin{pmatrix} E_{2x}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} = (1 - \gamma)e^{-\zeta L} \begin{pmatrix} (2\alpha_x - 1)J_{xx} & (1 - \alpha_x)^{1/2}(1 - \alpha_y)^{1/2} J_{xy} + \alpha_x^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{yx} \\ - \left[ \alpha_x^{1/2} \alpha_y^{1/2} J_{xy} + (1 - \alpha_x)^{1/2} (1 - \alpha_y)^{1/2} J_{yx} \right] & (1 - 2\alpha_y)J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}, \quad (3.35)$$

Considerando  $\gamma = 0$ ,  $\zeta = 0$  y  $\alpha_x = \alpha_y = \alpha$  la ecuación (3.35) para el campo transmitido queda de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} E_{2x}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2\alpha - 1)J_{xx} & (1 - \alpha)J_{xy} + \alpha J_{yx} \\ -\alpha J_{xy} - (1 - \alpha)J_{yx} & (1 - 2\alpha)J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}, \quad (3.36)$$

para el campo reflejado se tiene,

$$\begin{pmatrix} E_{1x}' \\ E_{1y}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2j(1 - \alpha)^{1/2} \alpha^{1/2} J_{xx} & j[\alpha^{1/2}(1 - \alpha)^{1/2} J_{xy} - (1 - \alpha)^{1/2} \alpha^{1/2} J_{yx}] \\ j[\alpha^{1/2}(1 - \alpha)^{1/2} J_{xy} - (1 - \alpha)^{1/2} \alpha^{1/2} J_{yx}] & 2j(1 - \alpha)^{1/2} \alpha^{1/2} J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix}. \quad (3.37)$$

Las ecuaciones (3.36) y (3.37) describen el comportamiento de los campos eléctricos a la salida del interferómetro formado por el acoplador y el brazo de fibra donde  $J_{ij}$  (con  $i = x, j = y$ ), es la matriz de Jones que da la información acerca del lazo de fibra de baja birrefringencia del interferómetro.

Posteriormente en las comprobaciones experimentales del interferómetro de Sagnac de fibra en trabajos de investigación o de aplicación se simulan algunos resultados de acuerdo al análisis numérico del arreglo propuesto. En dichos arreglos, la polarización de la luz de cada elemento (dispositivo discreto individual) del lazo de fibra es modelado por una matriz y con el producto obtenido (matriz de Jones) de las matrices individuales de los elementos, se sustituye en la ecuación (3.36), la ecuación resultante describe el campo eléctrico de salida del interferómetro del haz transmitido. Para encontrar la transmitancia se emplea la siguiente ecuación,

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}}, \quad (3.38)$$

donde  $I_{out} = K|E_2'|^2$  es la intensidad transmitida,  $K$  es una constante que depende de las unidades que se estén utilizando y  $E_2'$  es la ecuación (3.36). Con estas ecuaciones se realizan los cálculos numéricos en el paquete de programación "software libre", más adelante se describen otras de las ecuaciones en términos de matriz de algunos elementos que componen el lazo.

## CAPÍTULO 4

---

# DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

---

En los laboratorios de investigación y en las aplicaciones de hoy en día, a menudo es necesario llevar a cabo experimentos o hacer mediciones para confirmar, verificar y clarificar la teoría bajo estudio. Igualmente en este trabajo experimental con sistemas ópticos compuestos de múltiples componentes, se incluyó una descripción del experimento y la presentación de los detalles técnicos de todos los dispositivos que se utilizaron para la construcción del sistema (anexo II). Respecto a sus características, el montaje experimental es importante para la experiencia misma, por lo que en este capítulo se describen las interacciones entre cada uno de los elementos del interferómetro y se hace deducciones experimentales que, por supuesto, arrojan un resultado que deberá ser examinado cuidadosamente para así emitir una conclusión pertinente.

Para la realización del trabajo experimental se consideraron las aportaciones de varios autores. Se espera que este trabajo experimental llegue a servir de apoyo y cubra parte de una aplicación, como las que se describen en el capítulo 5 u otras, ya sea en sensores mecánicos (flujo, fuerza, torque, presión, velocidad, aceleración, etc.); térmicos (temperatura, calor, entropía, flujo de calor, etc.); eléctricos (voltaje, corriente, carga, resistencia, inductancia, capacitancia, etc.); magnéticos (intensidad de campo, densidad de flujo, momento magnético, permeabilidad, etc.); químicos (PH, concentración, oxidación, etc.); etc.

## 4.1 Consideraciones generales

Se montó experimentalmente varios arreglos con el interferómetro de Sagnac de fibra óptica para realizar lo siguiente:

- Efectuar una búsqueda minuciosa de la parte que cede fácilmente a la presión y que presente una respuesta en amplitud de salida significativa (intensidad de luz transmitida).
- Verificar que efectos tienen las torsiones en la fibra óptica.
- Aclarar el ajuste de la transmisión mediante la polarización.

Sin embargo se decidió acotar a tres arreglos que engloban los mejores resultados alcanzados. Donde cabe recalcar que montajes similares podrían mostrar ciertas respuestas diferentes, esto debido a muchos factores como las anomalías en la fibra, la forma de instalar el arreglo, los cambios provocados por empalmes y conectores, etc.

## 4.2 Montajes experimentales del interferómetro de Sagnac

Para realizar el diseño experimental de los arreglos con el interferómetro de Sagnac se consideraron primero las etapas que se describen a continuación y posteriormente se presentan los arreglos interferométricos montados.

### 4.2.1 Etapa de la apertura numérica (alineación del láser)

Para obtener una buena respuesta en un arreglo interferométrico se debe evitar atenuaciones como las mencionadas anteriormente en el capítulo 1, para ello se requiere de una buena alineación entre el diodo láser y la fibra óptica. Esto se realiza como se muestra en la figura 4.1. Primero se debe de ajustar el

controlador de laser universal IP500 a los valores de corriente y voltaje de operación del diodo laser L980P010. Para este diodo láser había que hacer un proceso de colimado lo cual resulto ser una tarea complicada que requiere mucha paciencia, esto por un ajuste manual de los ejes x y z, de una lente objetivo para conseguir una mejor apertura numérica y hacer que entrara a la fibra la mayor cantidad de luz. Se utilizó un tramo de fibra que conecta a un adaptador de acoplamiento esto con el fin de mantener firme y estable la alineacion de laser. Finalmente otro tramo de fibra es conectado a un detector para visualizar en el osciloscopio la potencia óptica en forma de variación de voltaje 0V a 10V de amplitud, esto por las características antes mencionadas del detector DET01CFC. Para obtener una apertura numérica de 100% se asegura tener 10V de amplitud (intensidad de luz).

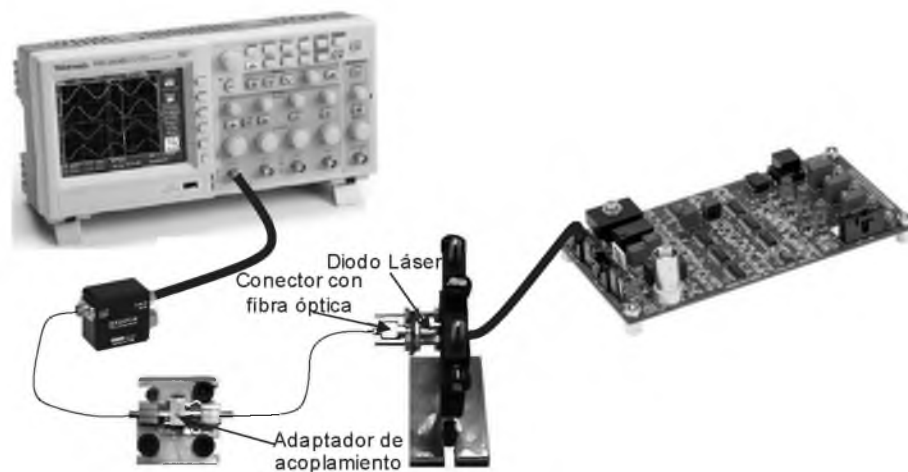


Figura 4.1. Etapa de la apertura numérica (alineación del láser).

### 4.2.2 Etapa del control de polarización

La figura 4.2 representa el montaje de la ecuación matemática de la Ley de Malus y tiene como objetivo tener un control de la polarización a la entrada de los arreglos interferométricos. Para esto se tiene que comprobar experimentalmente y visualizar si el controlador de polarización de tres placas realiza un control completo del estado de polarización de la luz, por esto se introduce un polarizador lineal (que se denomina analizador) y se mide la intensidad de la luz emergente con el osciloscopio, la cual en un principio fue menor y adicionalmente varió al rotarlo.

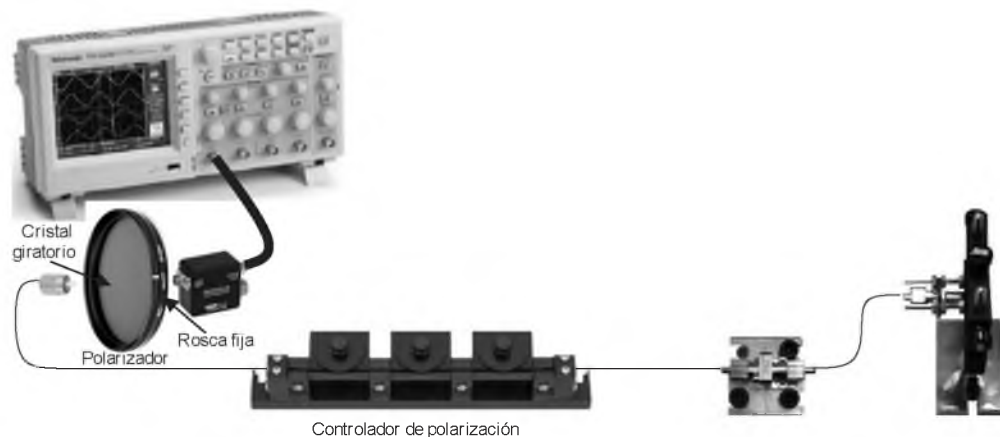


Figura 4.2. Arreglo polarimétrico usado para estudiar la polarización.

Así al ir ajustando las placas del controlador de polarización en posiciones determinadas y rotando el analizador por ángulos, la intensidad de la luz emergente presentó diferentes tipos de polarización (lineal, circular y elíptica) que se visualizó en el osciloscopio de la siguiente manera (figura 4.3).

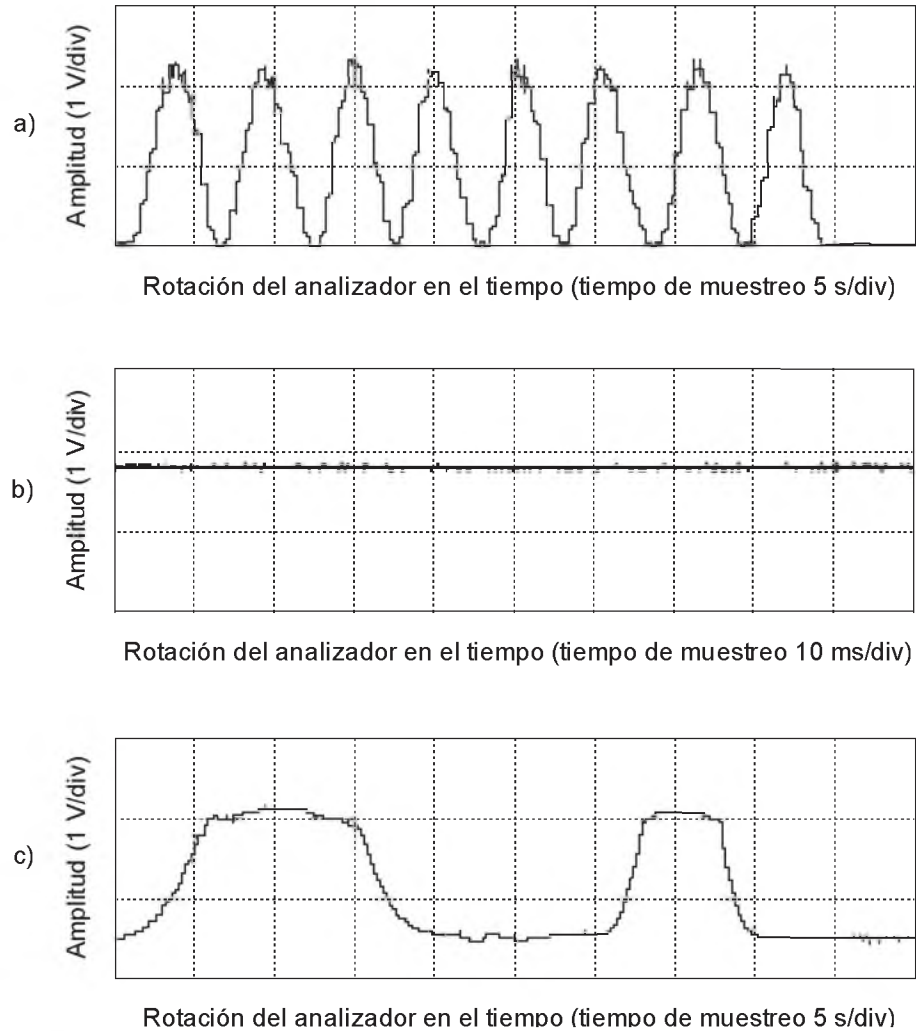


Figura 4.3. a) Polarización lineal, b) Polarización circular y c) Polarización elíptica.

### 4.2.3 Análisis y resultados de arreglos interferométricos

En esta parte del trabajo se presentan tres configuraciones del interferómetro de Sagnac de fibra óptica, cada una se analizó experimentalmente con el fin de observar sus características más relevantes para poder, más adelante, proponer aplicaciones basadas en la configuración de Sagnac. Una característica de las configuraciones estudiadas es que incluyen a la entrada un controlador de polarización que, a pesar de que se tenga el control de la

polarización de entrada, el problema es que el núcleo de la fibra no es perfectamente redondo, lo que origina dispersión de Mie a un grado tal que puede dejar a la señal en un estado que difícilmente pueda ser leído.

Cuando la luz viaja en una fibra monomodo hacia el receptor, tiene dos modos de polarización que viajan en dos ejes, y se mueven formando un ángulo recto uno del otro. En una fibra ideal las dos polarizaciones se propagarían a la misma velocidad de fase pero en realidad cualquier asimetría, curvatura o torsión hace que las dos polarizaciones se propaguen a diferente velocidad. La causa es la birrefringencia. Esto quiere decir que la velocidad de la luz depende de la ruta que toma a lo largo de la fibra.

En resumen, la evolución del estado de polarización de la luz a lo largo de una fibra óptica torcida (figura 4.4) no sólo es más compleja que el modelo comúnmente usado, que expresa que la torsión induce birrefringencia circular; sino que además depende del proceso de fabricación utilizado en su manufactura [38]. Un estudio profundo a este problema llevaría a hablar de la matriz de birrefringencia de una fibra torcida sin embargo aquí solo se muestra como una torsión puede resultar benéfica para algunas aplicaciones en sensores de fibra óptica.

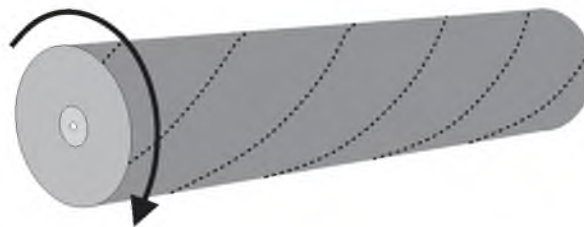


Figura 4.4. Tramo de fibra torcida.

En el análisis experimental del interferómetro de Sagnac de fibra óptica primero se utilizó el arreglo básico que se muestra en la figura 4.5. Empleando un acoplador simétrico (50/50) y uniendo dos de sus extremos por un lazo de fibra de 4 metros de longitud. A la salida se conectó un detector para visualizar la transmisión en un osciloscopio.

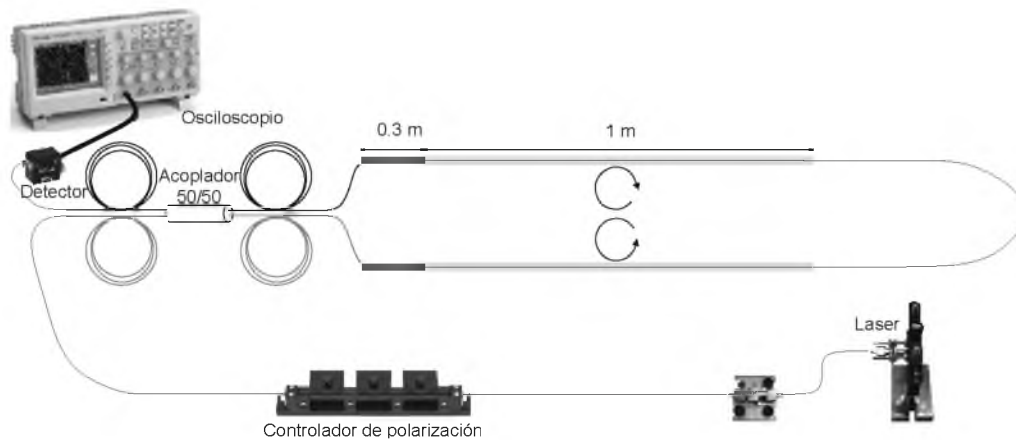


Figura 4.5. Primer arreglo interferométrico propuesto.

Adicionalmente se empalmaron dos tramos de fibra de 1 metro de longitud en cada uno de los extremos del acoplador los cuales también formaban parte del lazo. Se colocó un polarizador de fibra óptica a la entrada del interferómetro. En un principio, la transmisión visualizada en el osciloscopio presentaba considerables variaciones en amplitud. Al ir variando la polarización de entrada, esto es, tendiendo a que sea más circular y aumentando la torsión en los brazos del interferómetro se fue observando que la amplitud de salida se mantenía cada vez más estable. Al tener polarización de entrada circular y una torsión en los brazos de  $40\pi$ , claramente se observó como un extremo del lazo cedía a la presión, esto es, al aplicarle una presión aproximada de 3 Newtons (medida con un dinamómetro) en intervalos de tiempo irregulares.

En la figura 4.6 se observa variaciones de amplitud de alrededor de 4 mili volts al aplicarle presión a un trozo de fibra en el lazo.



Figura 4.6. Amplitud de salida del primer arreglo interferométrico al aplicarle 3 Newtons de fuerza a un trozo del lazo.

Existen trabajos previos de Ibarra-Escamilla *et al.* [25], sobre el NOLM propuesto por Kuzin [39] en el cual agregan una placa retardadora de  $\lambda/4$  (QWP, Quarter-Wave Plate) a uno de los brazos del interferómetro y emplean fibra altamente torcida para que la birrefringencia residual presente no afecte la operación del interferómetro, demostrando que con solo una rotación de la QWP se puede ajustar fácilmente la transmisión del interferómetro sobre un rango amplio de valores (del 2% al 82% en transmisión). Tomando en cuenta estos resultados y considerando que la torsión de la fibra elimina la birrefringencia lineal haciéndolo menos sensible a las condiciones ambientales y que al mismo tiempo, la torsión produce birrefringencia circular y aparece una diferencia de velocidades de grupo para campos con polarización circular [31], se modificó el primer arreglo agregando una QWP y aumentando a  $50\pi$  la torsión en los brazos del interferómetro (figura 4.7).

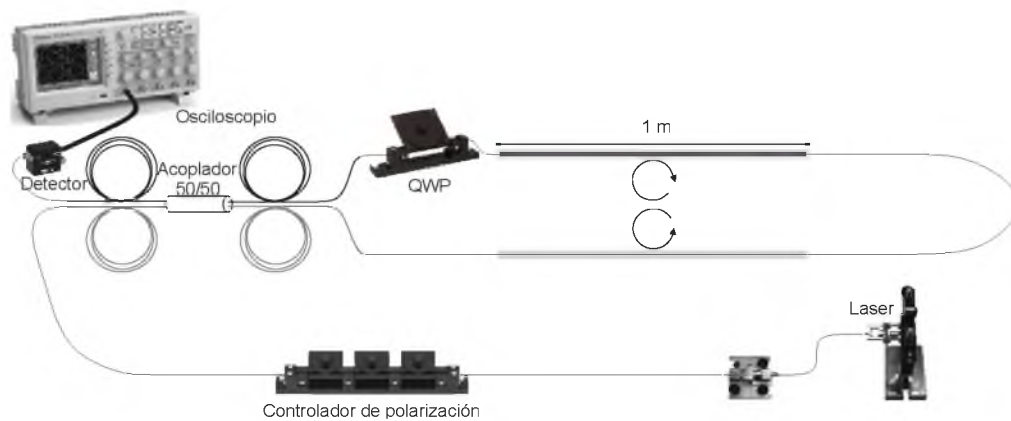


Figura 4.7. Segundo arreglo incluyendo la QWP en el lazo.

La figura 4.8 muestra el comportamiento de la amplitud de salida (transmisión) del interferómetro al someterlo a las mismas condiciones de presión que el anterior arreglo, y se observa como la amplitud de las perturbaciones aumento en comparación con la figura 4.6 debido a la fuerte actividad óptica presente en la fibra. Este dispositivo presenta y mantiene una operación estable y repetitiva al girar la QWP. Al girar la QWP se obtiene pulsos de mayor amplitud como los cuatro pulsos a la derecha en la figura 4.8. Este esquema sirve en el desarrollo de dispositivos sensores en el que podemos controlar e intervenir en la evolución de la polarización para ajustar la transmisión a nuestro beneficio.

A la vista del segundo arreglo interferométrico se tiene la representación esquemática de la evolución de la polarización en el interferómetro (figura 4.9).

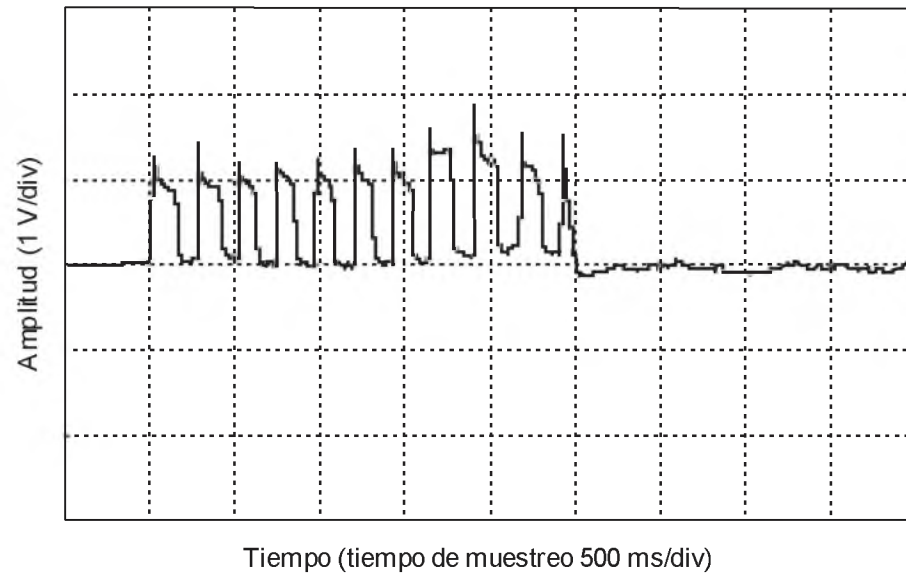


Figura 4.8. Amplitud de salida del segundo arreglo interferométrico propuesto con QWP en el lazo.

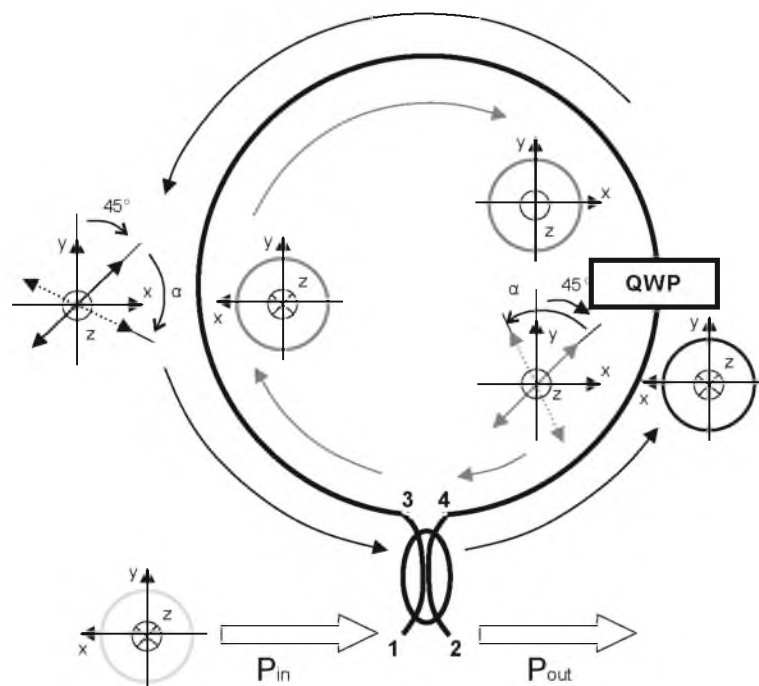


Figura 4.9. Representación esquemática de la evolución de la polarización en el interferómetro bajo estudio.

Teniendo un haz de entrada con polarización circular, el acoplador simétrico divide el haz en dos haces con la misma potencia y polarización, dichos

haces se propagaran en el lazo en las direcciones del sentido de las manecillas del reloj (CW) y en sentido contrario de las manecillas del reloj (CCW) respectivamente. Debido a la posición asimétrica de la QWP cerca del puerto 4, el haz en la dirección CW tiene durante su propagación una polarización circular, la cual se mantiene debido a una fuerte actividad óptica en la fibra. Después de propagarse en el lazo, la polarización circular cambia a una polarización lineal, la cual hará un ángulo de  $45^\circ$  con los ejes principales del QWP, en la misma dirección que el haz CW. Para el haz CCW, de una polarización circular pasa a una polarización lineal por acción de la QWP. En el lazo, la polarización será rotada debido a la actividad óptica, pero permanecerá en un estado de polarización lineal. Durante su propagación dentro del lazo el haz CW esta circularmente polarizado, mientras que el haz en dirección CCW esta linealmente polarizado, acumulándose una diferencia de fase entre ambos haces. La salida del NOLM es entonces obtenida por la combinación de dos haces linealmente polarizados.

Finalmente se muestra un tercer arreglo (figura 4.10) donde se modificó la posición de la QWP, además de colocarla en el brazo contrario y en una posición asimétrica, se enrollaron 20 metros de fibra torcida (razon de torsión  $16\pi/m$  en sentido de las manecillas del reloj) en un tubo de PVC con un diámetro de 4 pulgadas formando una bobina.

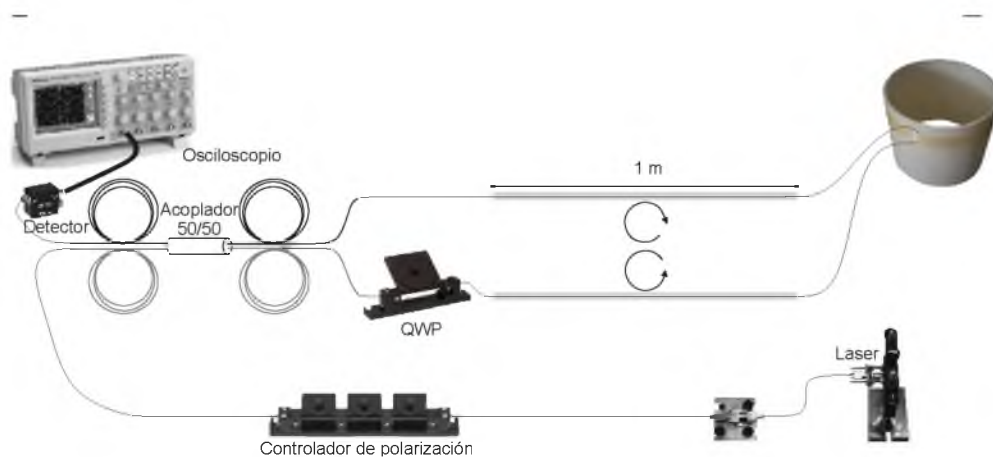


Figura 4.10. Tercer arreglo interferométrico propuesto.

Esta bobina de fibra presentó una respuesta favorable (figura 4.11) a rotaciones angulares lo cual permite tener aplicaciones tan importantes como los giróscopos de fibra y medir movimientos angulares. Además con la rotación de la bobina se tiene variaciones en la amplitud de salida para hacer mediciones de rotación o seleccionar un punto de operación que mejor convenga a una aplicación en particular.

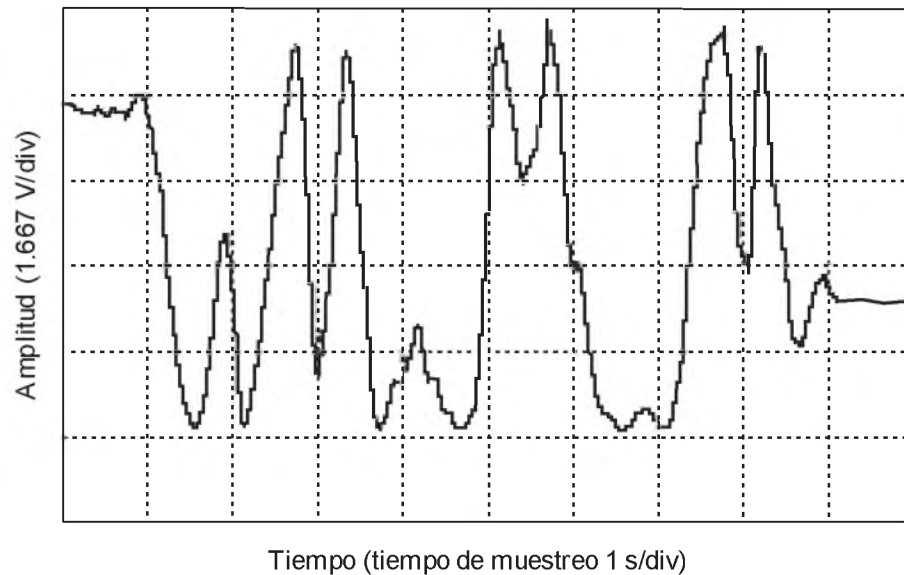


Figura 4.11. Variaciones de amplitud en el tiempo producidas por la rotación de la bobina de fibra.

En la figura 4.12 se observan variaciones de amplitud en el tiempo que se consiguen al ir rotando la QWP a una determinada velocidad. Asimismo el ajuste en amplitud al rotar la QWP permitió exhibir la simetría que se produce al rotar la placa en determinado ángulo y regresarla a su posición original. Este hecho se demuestra a un ángulo de rotación de la QWP de  $0^\circ$  a  $240^\circ$  y de  $240^\circ$  a  $0^\circ$ , identificando con esto un preciso trabajo que realiza la QWP.

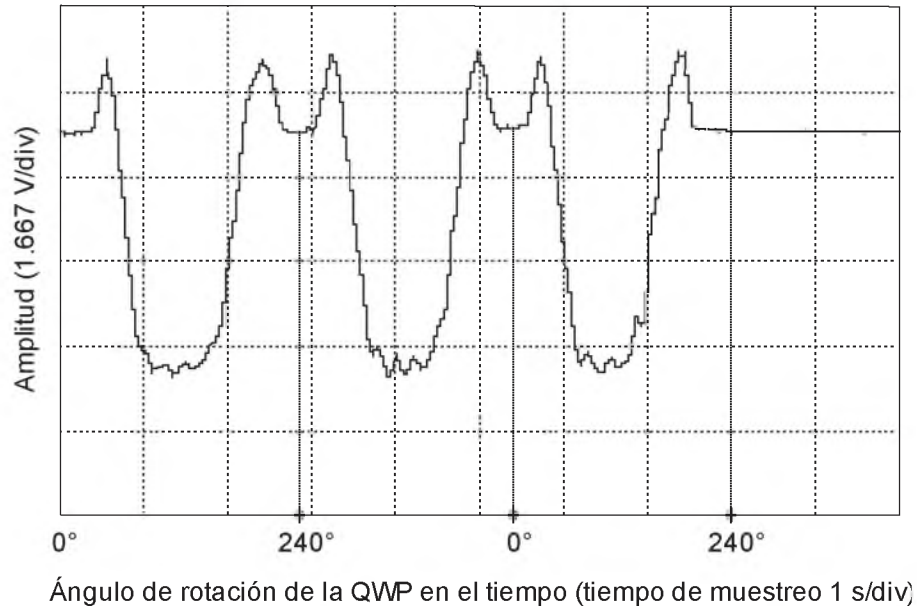


Figura 4.12. Amplitud y simetría producida al rotar la QWP.

En este análisis sobre los tres arreglos es importante observar que la transmisión del Sagnac varía dependiendo de las condiciones que se presenten en el lazo de fibra, un cambio por una magnitud externa modifica o altera las propiedades ópticas de la fibra en la zona de detección a lo largo esta y modula las características de la luz (intensidad de la radiación guiada, fase, plano de polarización o frecuencia). La detección de estas alteraciones en la transmisión es medible, y empleándola adecuadamente da lugar a diferentes sensores de fibra óptica.

Por otra parte en los arreglos, la birrefringencia presente en la fibra cambió el estado de polarización inicial, misma que también cambió por la presencia de la QWP. Donde se observó que con la posición de la QWP podemos ajustar la transmisión y que dicha transmisión depende en gran medida de las condiciones que se presenten en el lazo de fibra y por lo tanto de la polarización de la luz, además de las características de los brazos de fibra que forman el lazo del interferómetro.

En definitiva, es posible construir un arreglo basado en la configuración de Sagnac para lograr detectar y evaluar parámetros, tanto físicos como químicos o biológicos. Por ejemplo temperatura, presión, tensión, campo eléctrico, o la presencia de determinados compuestos químicos o bioquímicos, facilitar la detección de proteínas o la malformación en genes. Este tipo de sensores ofrecen en primer lugar una ventaja fundamental: pueden miniaturizarse con facilidad, lo que resulta de extrema utilidad en lugares confinados. Además, el material de las fibras ópticas permite su utilización segura en ambientes con riesgo de explosión, inflamable, no se corroe ni se deteriora y resiste la radiactividad, en presencia de radiaciones ionizantes e incluso en células y tejido vivo.

## CAPÍTULO 5

---

# PERSPECTIVAS DEL TRABAJO Y CONCLUSIONES FINALES

---

Durante los últimos años se han visto con asombro el desarrollo de sistemas mecatrónicos capaces de realizar tareas donde la seguridad del ser humano es fundamental. Estos sistemas integrados por sensores, microprocesadores, controladores y actuadores, tienen por objetivo mejorar el funcionamiento de otros elementos con nuevas herramientas sinérgicas a través de la optimización de cada uno de sus subprocesos.

Así mismo, esta mejora sobre los avances tecnológicos impone nuevos retos en el desarrollo de sensores, que deben ser resueltos de forma apropiada. En este sentido el estudio del interferómetro de Sagnac de fibra óptica como dispositivo sensor, aportará a diferentes campos de estudio una manera diferente para detectar y evaluar parámetros físicos, aplicando conceptos ópticos en un problema común.

En este capítulo se ha apostado por iniciar el desarrollo de algunas aplicaciones haciendo uso de lo aprendido y experimentado con el interferómetro de Sagnac de fibra, de tal modo que el objetivo no es llegar a tener un elemento final, sino una herramienta base para poder desarrollar distintos sensores en este campo y extenderse, en un futuro, a nuevas ideas en el desarrollo de mecanismos activos, control de vibraciones, estabilización y navegación autónoma por mencionar algunos.

### 5.1 Análisis numérico del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos QWP en el lazo

Con respecto a lo previamente mostrado en la cual se agrega una QWP a uno de los brazos de fibra que forman el lazo del interferómetro para controlar la transmisión con el simple hecho de girar esta, y que además, presenta el mismo comportamiento (regresa por el mismo camino) al hacer girar la QWP primero en un sentido y luego de regreso. Se propone el esquema que se muestra en la figura 5.1. Este consiste en un acoplador simétrico donde sus puertos 3 y 4 están conectados a través de una fibra altamente torcida y dos QWP en el lazo.

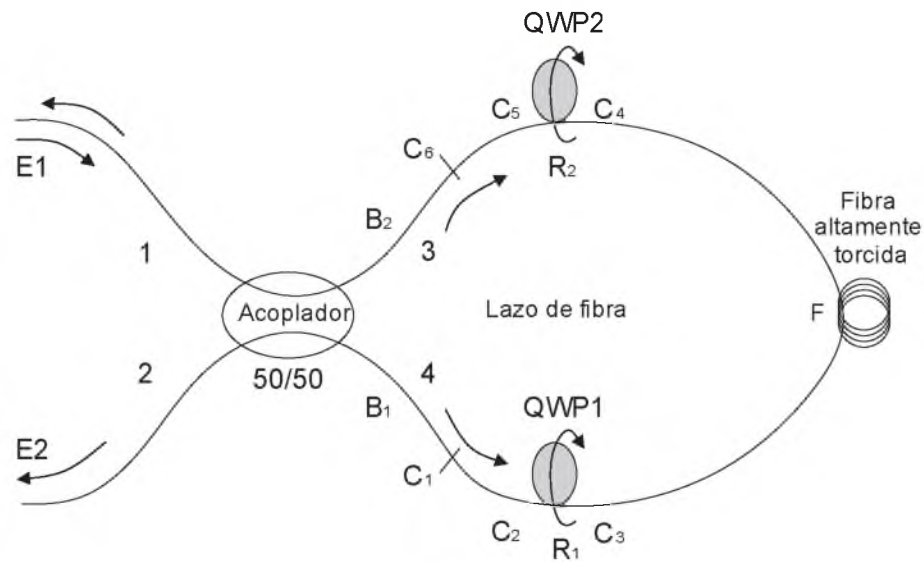


Figura 5.1. Esquema del FOLM.

No obstante, muchas veces en el desarrollo de nuevos dispositivos o esquemas es necesario contar con simulaciones numéricas con el fin de variar parámetros fácilmente y observar el comportamiento del dispositivo o esquema y compararlo con resultados experimentales (en el caso de que haya). Por tanto

antes de desarrollar las aplicaciones, se hizo un análisis numérico del comportamiento de la transmisión en función del ángulo de rotación de la QWP.

Este análisis esta basado en los estudios del FOLM [25, 37, 40, 41] donde utilizan una matriz (matriz de Jones) para modelar cada elemento que forma el lazo del interferómetro. Suponiendo que el campo eléctrico a la salida y entrada de cada matriz es presentado en un sistema coordenado que coincide con los ejes principales de la fibra. El haz de entrada con un campo  $E_1$  se introduce por el puerto 1 y el haz de salida con un campo  $E_2$  es medido en el puerto 2.

En el análisis, para describir la transmisión se emplea la ecuación (3.36) para el campo transmitido que se describió anteriormente. La matriz  $J$  es calculada empleando lo que se obtiene de un producto de matrices de Jones (ecuación 5.1) que representan el comportamiento de cada elemento que compone el lazo.

$$J = B_1 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot C_3 \cdot F \cdot C_4 \cdot R_2 \cdot C_5 \cdot C_6 \cdot B_2. \quad (5.1)$$

De esta manera se tiene que las matrices  $B_1$  y  $B_2$  describen la birrefringencia y torsión existentes en los puertos 3 y 4 del acoplador respectivamente, estas matrices están dadas por,

$$B_1 = \begin{pmatrix} \cos \eta_{B_1} - i(\delta_{1,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} & (\delta_{c,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} \\ -(\delta_{c,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} & \cos \eta_{B_1} + i(\delta_{1,B_1}/2) \sin \eta_{B_1}/\eta_{B_1} \end{pmatrix}, \quad (5.2)$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} \cos \eta_{B_2} - i(\delta_{1,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} & (\delta_{c,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} \\ -(\delta_{c,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} & \cos \eta_{B_2} + i(\delta_{1,B_2}/2) \sin \eta_{B_2}/\eta_{B_2} \end{pmatrix}. \quad (5.3)$$

Donde  $\eta_{B_1} = \sqrt{(\delta_{1,B_1}/2)^2 + (\delta_{c,B_1}/2)^2}$  y  $\eta_{B_2} = \sqrt{(\delta_{1,B_2}/2)^2 + (\delta_{c,B_2}/2)^2}$ ,  $\delta_{1,B_1} = (2\pi/\lambda)L_1\Delta n_1$  y  $\delta_{1,B_2} = (2\pi/\lambda)L_2\Delta n_2$  son la retardancia lineal,  $L_1$  y  $L_2$  la

longitudes de la fibra del brazo,  $\Delta n_1$  y  $\Delta n_2$  la birrefringencia lineal de la fibra en los brazos 3 y 4 del acoplador respectivamente,  $\lambda$  es la longitud de onda del haz de entrada,  $\delta_{c,B_1} = 2(1 - g/2n)\tau_1$  y  $\delta_{c,B_2} = 2(1 - g/2n)\tau_2$  son la retardancia circular,  $n$  es el índice de refracción de la fibra,  $\tau_1$  y  $\tau_2$  son el ángulo de torsión de la sección de fibra acoplada a los puertos 3 y 4 respectivamente. El parámetro  $g$  encierra la birrefringencia circular y la torsión de la fibra, para fibras de silicio-vidrio  $g = 0.13 - 0.16$  [42].

La matriz  $C_1$  y  $C_6$  incluye un ángulo inicial no conocido entre los ejes principales del acoplador (puerto 4 y 3) y el eje de la QWP1 y QWP2,  $\theta_1$  y  $\theta_4$  respectivamente. Esta matriz está dada por,

$$C_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix}, \quad (5.4)$$

$$C_6 = \begin{pmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 \end{pmatrix}. \quad (5.5)$$

Las matrices  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$ ,  $C_5$  describen las rotaciones de las QWP1 y QWP2 respectivamente,

$$C_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix}, \quad (5.7)$$

$$C_4 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \end{pmatrix}, \quad (5.8)$$

$$C_5 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 \end{pmatrix}, \quad (5.9)$$

donde  $\theta_2$  es el ángulo de rotación de la QWP1 y  $\theta_3$  de la QWP2. Para la matriz  $R_1$  y  $R_2$  que describe las QWP son dadas por.

$$R_1 = \begin{pmatrix} \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & \exp(-i\pi/4) \end{pmatrix}, \quad (5.10)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & \exp(-i\pi/4) \end{pmatrix}. \quad (5.11)$$

Finalmente usando la matriz de Jones para una fibra birrefringente torcida F.

$$F = \begin{pmatrix} \cos \eta - \pi L_n \sin \eta / \eta & \delta_c / 2 \sin \eta / \eta \\ -\delta_c / 2 \sin \eta / \eta & \cos \eta + \pi L_n \sin \eta / \eta \end{pmatrix}. \quad (5.12)$$

Donde  $\eta = \sqrt{(\pi L_n)^2 + (\delta_c / 2)^2}$ ,  $L_n = L_{\text{fiber}} / L_{\text{beat}}$  es la relación entre la longitud de la fibra ( $L_{\text{fiber}}$ ) y la longitud de repetición ( $L_{\text{beat}}$ );  $\delta_c = 2(1 - g/2n)\tau$  es la birrefringencia circular,  $n$  es el índice de refracción de la fibra y  $\tau$  la fibra torcida.

Ahora el producto obtenido de la ecuación (5.1), se sustituye en la ecuación (3.36) y para encontrar la transmitancia se emplea la ecuación (3.38). Los siguientes valores fueron utilizados para llevar a cabo la simulación numérica en un "software libre": longitud de onda de 980nm, polarización circular a la entrada del NOLM,  $n=1.46$ ,  $L_{\text{fiber}}$  de 20 m de  $16\pi/m$  de fibra torcida,  $L_{\text{beat}}$  de 19m, el parámetro  $g=0.145$  y las fibras  $B_1$  y  $B_2$  con misma torsión ( $\tau_1 = \tau_2 = 4\pi$ ).

Experimental y numéricamente se rotó la QWP1 mientras que la QWP2 permanece fija a un ángulo arbitrario. En la figura 5.2 se muestra el resultado de la simulación y el resultado experimental. Lo cual se obtuvo el mismo comportamiento y se comprobó la dependencia que tiene la transmisión sobre el ángulo de rotación de la QWP1. Además se observan dos picos con diferente

amplitud en un periodo de  $180^\circ$ . Quedando demostrado que la transmisión máxima visualizada en el primer pico es de alrededor del 45% mientras que para el segundo pico está cerca de los 10%, observando que se adquiere la mayor transmisión cuando la QWP1 está a un ángulo de  $95^\circ$  y para lograrla se gira cerca de  $55^\circ$  la QWP1. En el recuadro superior derecho se observa la amplitud transmitida capturada directamente de la pantalla del osciloscopio.

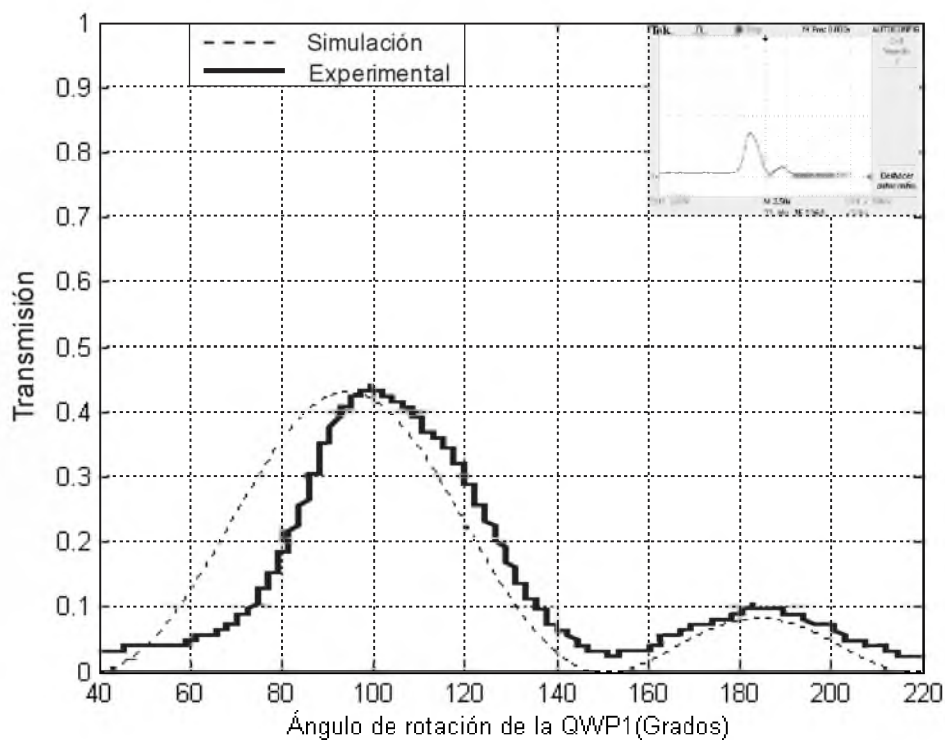


Figura 5.2. Primera comparación de los resultados entre la simulación numérica y el experimental.

Ahora cambiando a otro ángulo fijo la QWP2 y de nuevo rotando la QWP1, se percibió una variación de la amplitud transmitida como se muestra en la figura 5.3. Visualizando que el pico de mayor transmisión se recorrió a  $220^\circ$  con una transmisión de 70%. En este caso solo se observa un pico en un periodo de  $180^\circ$  y se llega a la máxima transmisión al recorrer aproximadamente  $90^\circ$  la QWP1,  $35^\circ$

más que el caso anterior. De igual forma en el recuadro superior derecho se observa la amplitud transmitida capturada directamente de la pantalla del osciloscopio.

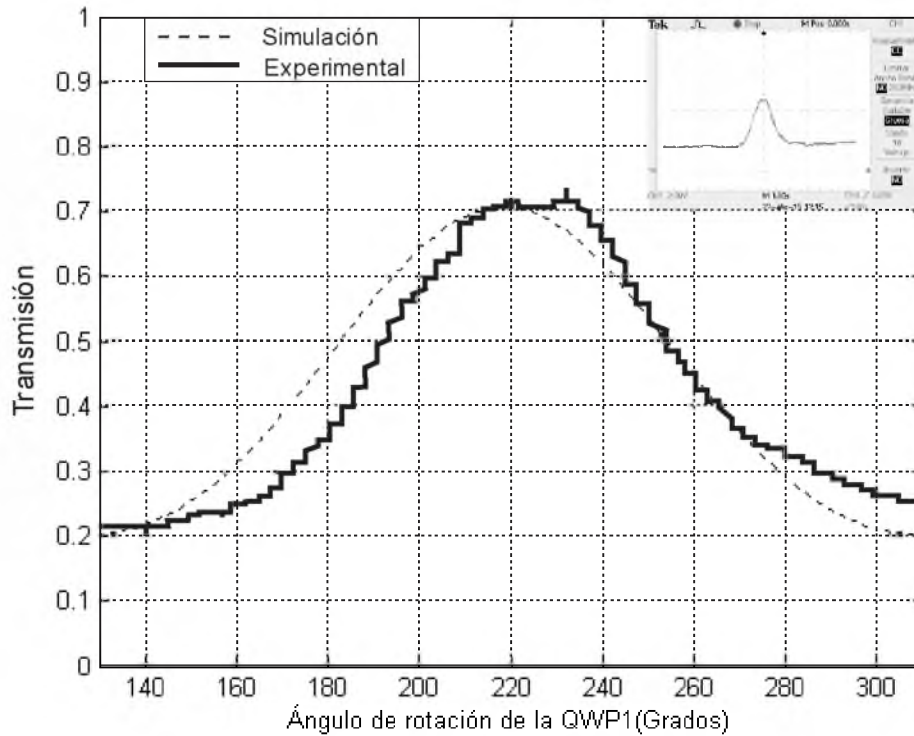


Figura 5.3. Segunda comparación de los resultados entre la simulación numérica y el experimental.

Con esto se probó que los resultados experimentales coinciden con las simulaciones numéricas pues se obtuvo gráficas con el mismo comportamiento. Por otro lado, se observó que la transmisión del interferómetro al ser ajustado rotando ambos QWP, se obtiene una mayor transmisión y un rango mayor de medición (rotación). Todo esto hace pensar en una situación en particular, en los casos anteriores se fijaba a un ángulo una de las placas y se rotaba la otra, pero ¿qué pasa si ambas placas son rotadas al mismo tiempo?.

## 5.2 Arreglo experimental del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos QWP como sistema de control

La definición de control manual o humano de lazo cerrado, es aplicable a infinidad de cosas. Algunas de ellas son de medición bastante frecuente, como cuando conducimos un automóvil y otras más espaciadas, como cuando verificamos nuestro estado financiero, mensual o anual.

De esta forma lo más sencillo y conocido en los laboratorios para obtener una respuesta del sistema en los prototipos implementados, es la intervención del hombre sobre el elemento de control. El operador humano no sólo aporta (o propone) el valor deseado, sino que también observa (mide) la condición controlada, compara, decide y actúa sobre el sistema, constituyendo todos los bloques excepto el proceso mismo.

En concreto, se aprovechó el arreglo experimental del interferómetro empleando un acoplador simétrico y dos QWP, como sistema de control de lazo cerrado cuyo montaje se muestra en la figura 5.4.

En este caso se ocupó otra vez el lazo del interferómetro compuesto de 20 metros de fibra con una razón de torsión de  $16\pi/m$  en sentido de las manecillas del reloj enrollada en un tubo de PVC. El principio de funcionamiento es el siguiente:

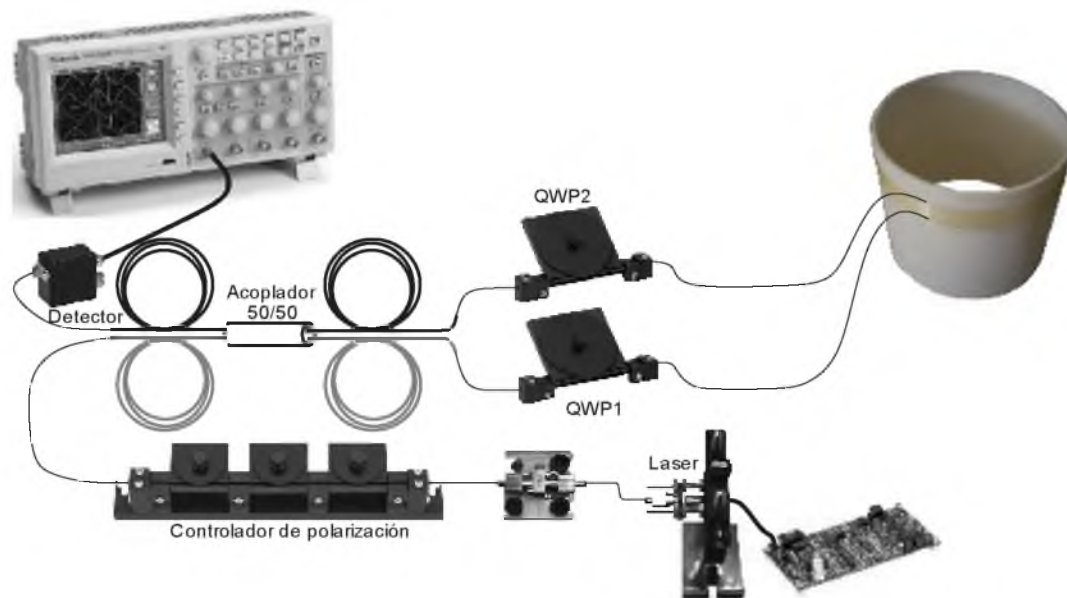


Figura 5.4. Esquema propuesto del interferómetro de Sagnac como sistema de control con dos QWP.

Al girar el cilindro de PVC se selecciona una amplitud de operación en particular, digamos 5 volts, si hay causas externas que desvíen esta amplitud, ya sea, 4.9 volts (por debajo de la referencia) o 5.1 volts (por arriba de la referencia), dando una pequeña rotación a una de las dos QWP se consigue volver a estabilizar los 5 volts del sistema. Una QWP estabiliza por arriba del valor de referencia y la otra por debajo o viceversa.

La figura 5.5 muestra el resultado directamente del osciloscopio obtenido al rotar individualmente cada una de las QWP. En el contexto de un plano de referencia deseado, se fija tres amplitudes de referencia, a) 2.8V, b) 5V y c) 6.8V, esta amplitud se ajusta al girar el lazo de fibra óptica enrollada en el núcleo de PVC.

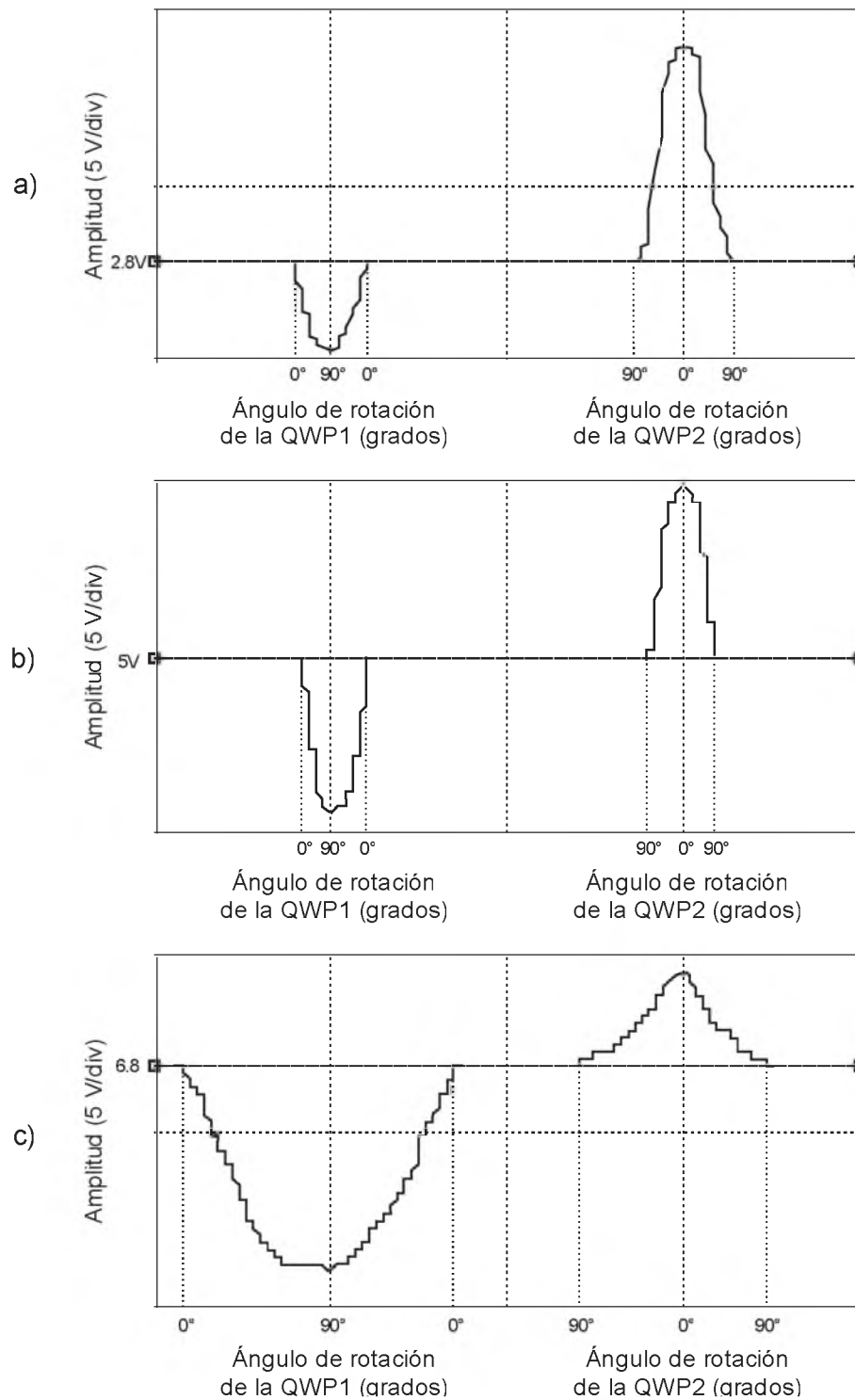


Figura 5.5. Rotación de las QWP para controlar y estabilizar la amplitud a una referencia deseada, a) 2.8V, b) 5V y c) 6.8V.

Visualizando que QWP1 gira de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y luego regresa a  $0^\circ$ , QWP2 primero gira de  $90^\circ$  a  $0^\circ$  y regresa a  $90^\circ$ , obsérvese la simetría que se obtiene en amplitud al girar y regresar nuevamente al punto de referencia. Además, en cada caso, QWP1 controla la amplitud por debajo de la amplitud de referencia y QWP2 por arriba. Si por alguna perturbación externa la amplitud se desvía por arriba de la amplitud de referencia, se tendrá que rotar QWP2 y al contrario, si la amplitud se desvía por debajo de la amplitud de referencia, se habrá que rotar QWP1.

Por ello, aquí el operador humano actúa como controlador; la intención es mantener el voltaje captado por el detector a un valor determinado y con el osciloscopio instalado a la salida del interferómetro de Sagnac, visualizar el voltaje (este voltaje es la amplitud de salida del sistema). Si el operador observa el osciloscopio y descubre que la amplitud es superior o inferior al deseado, reduce o aumenta la rotación del QWP1 o QWP2 según sea el caso. Es posible que la acción correctiva no sea la requerida y ahora la amplitud permanezca abajo (o arriba) del valor deseado por lo que tendrá que hacer la operación contraria, y así sucesivamente, con correcciones cada vez más pequeñas, hasta obtener el valor deseado de amplitud.

En la figura 5.6 se representa una analogía del esquema con un sistema básico de lazo cerrado de control manual ya que el operador es el que realiza las acciones de retroalimentación de la salida (amplitud del haz transmitido) por medio de la vista, comparando con la referencia (amplitud deseada) por medio del cerebro y corrección de la posición de la QWP1 y QWP2 por la acción de sus manos.

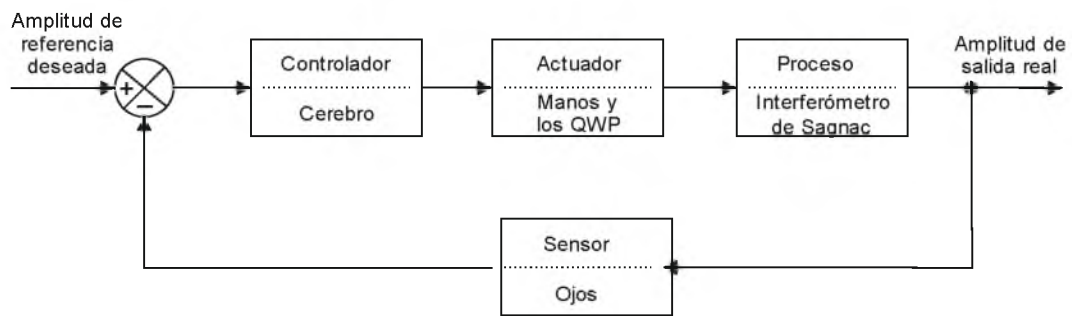


Figura 5.6. Comparación del sistema con un diagrama a bloques de un control en lazo cerrado donde una persona actúa como controlador.

Con ello se notan características propias de los sistemas realimentados, al mostrar varias propiedades importantes del comportamiento dadas por la interacción de cada una de las partes.

En conclusión, este sistema de control manual será convertido a un sistema de control automático ya que los ojos del operador humano no son capaces de percibir cambios a gran velocidad de la totalidad de los datos (recordando que la velocidad de la luz se estima en  $3 \times 10^8$  m/s), ni mucho menos mantener el sistema estabilizado.

Del mismo modo, respecto a lo que se observa en la figura 5.5b, una rotación constante y sincronizada en QWP1 (de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) y QWP2 (de  $90^\circ$  a  $0^\circ$ ) no produciría cambio en los 5V de referencia deseados manteniendo siempre constante la salida, considerando esto, una aplicación interesante para este sistema podría ser en control de estabilidad de vuelo. En un sistema de vuelo, suponiendo un motor provisto de una hélice que es alimentado con un voltaje de referencia para mantenerlo en equilibrio, una perturbación externa originaría un desequilibrio o desbalance que sería captado por una de las QWP suspendidas libremente la cual daría la señal al control de corregir la salida y regresar al

sistema a su posición de equilibrio de manera inmediata logrando estabilizar el vuelo (figura 5.7).

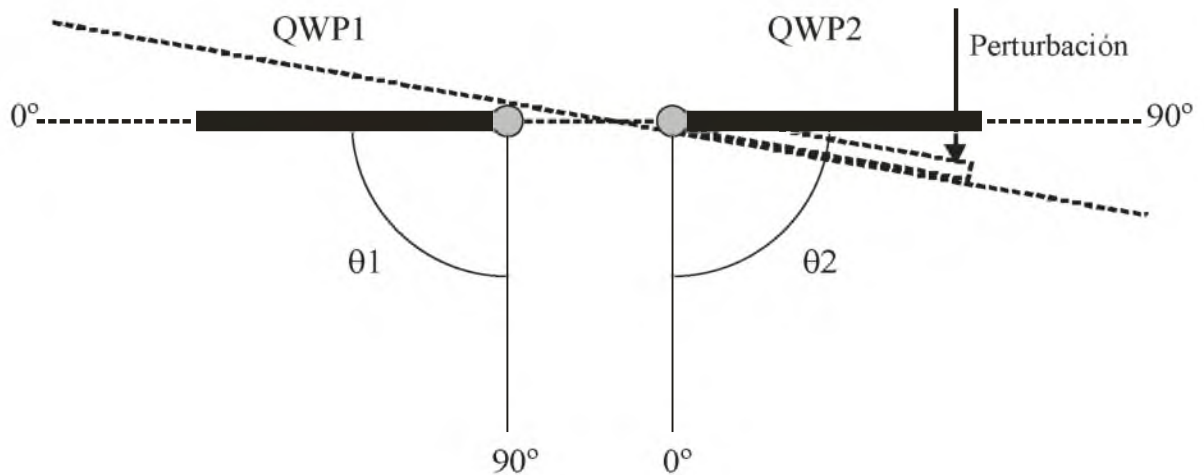


Figura 5.7. Visualización de una posible implementación de la posición de las QWP en un vehículo de vuelo donde una perturbación origina un desequilibrio captado por una QWP.

Aparte de eso se pueden desarrollar muchas aplicaciones que tomen en cuenta el papel que juega la fibra en el lazo en el proceso de detección para desarrollar sensores de fibra óptica como dispositivos intrínsecos en los que la interacción tiene lugar dentro de la fibra, por lo que la fibra sería parte activa del proceso de detección ya sea como sensor directo, donde el parámetro a medir actúa directamente sobre la fibra o indirecto en el cual el parámetro a medir se transforma en otro parámetro que actúa en la fibra.

### **5.3 Arreglo experimental del interferómetro de Sagnac empleando un acoplador simétrico y dos QWP como monitoreo de vibraciones mecánicas**

Actualmente, el uso de fibra óptica es utilizada a nivel industrial por las ventajas que presenta, como son: bajo costo, alta confiabilidad, robustez, capacidad de trabajar en ambientes explosivos, por esta razón, sus aplicaciones en el mantenimiento de equipos e instalaciones industriales cobra una gran importancia porque las exigencias de calidad de la producción son cada vez mayores y al hecho de que las empresas necesitan ser más competitivas en el ámbito del comercio tanto nacional como internacional. Así las nuevas estrategias de monitoreo de vibraciones mecánicas con los equipos en funcionamiento es vital en el sector industrial, ya que evitar el paro de la producción e incurre en gastos innecesarios de mantenimiento. Exactamente, esto es lo que pretendemos aportar con este prototipo.

De esta forma los monitoreo de las vibraciones se obtuvieron a partir del arreglo de la FOLM empleando un acoplador simétrico, dos QWP y una longitud de 5 cm del lazo de fibra colocada en un cono resonante para captar vibraciones mecánicas como se observa en la figura 5.8.

Las vibraciones mecánicas eran producidas por un generador de ondas mecánicas provisto de una placa de Chladni cuya frecuencia de vibración era controlada mediante un generador de señales. El generador de señales alimenta al generador de ondas mecánicas con una señal controlable en todo momento, tanto en frecuencia como en amplitud. Cuando la placa de Chladni vibra cerca de su frecuencia natural esta entrara en resonancia, lo que implica que habrá regiones con grandes desplazamientos y otras donde los desplazamientos serán nulos. Justamente estos desplazamientos no nulos de la placa de Chladni serán captados por el cono para transmitirlos a la fibra.

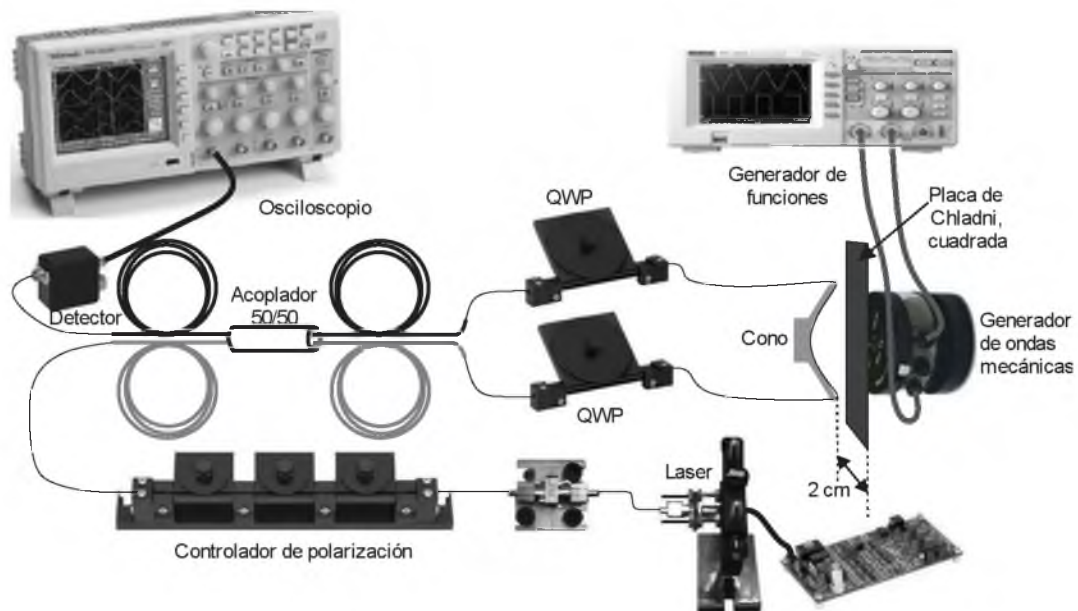


Figura 5.8. Esquema del interferómetro de Sagnac para el monitoreo de vibraciones.

En ese sentido el cono de resonancia se comporta como receptor, captando las vibraciones mecánicas de la placa de Chladni ya que esta empuja el aire que la rodea produciéndole una compresión que se transmite a una velocidad de unos 343 m/s (velocidad del sonido en el caso ideal). La propagación es longitudinal porque el aire es un fluido en estado gaseoso con débiles fuerzas de cohesión entre sus moléculas. Por ello, la perturbación únicamente se propaga en la dirección en la que unas moléculas "chocan" con sus vecinas. Por lo tanto las ondas sonoras hacen vibrar al cono y la introducen en la fibra óptica, haciéndola vibrar. Estas vibraciones se transmiten a la luz que recorre el lazo, lo que se traduce en cambios en amplitud de la transmisión a la salida del interferómetro. Allí, intentamos comparar las vibraciones sonoras captadas con las vibraciones reales de la placa de Chladni.

En este contexto el uso de dos placas retardadoras, proporciona dos estados de polarizaciones iguales y en este caso lineales, con alguna orientación en la superficie de fibra que capta la vibración. El efecto que se produce al tener

dos estados de polarización iguales en la superficie de sensado aún está en estudio, pero se observó experimentalmente que son necesarios para detectar la vibración.

Por lo tanto a una distancia de la separación entre el cono de resonancia y la placa de Chladni de 2 cm se obtuvo el resultado mostrado en la figura 5.9, a una frecuencia de vibración de 28.57 Hz. Quedando mostrado que hay una gran diferencia en amplitud pero la frecuencia es prácticamente la misma entre la señal real de vibración de la placa de chladni y la señal de vibración de la fibra obtenida a la salida del interferómetro. Además se observa un desfase entre ambas señales que puede ser originado por el detector conectado directamente al osciloscopio.

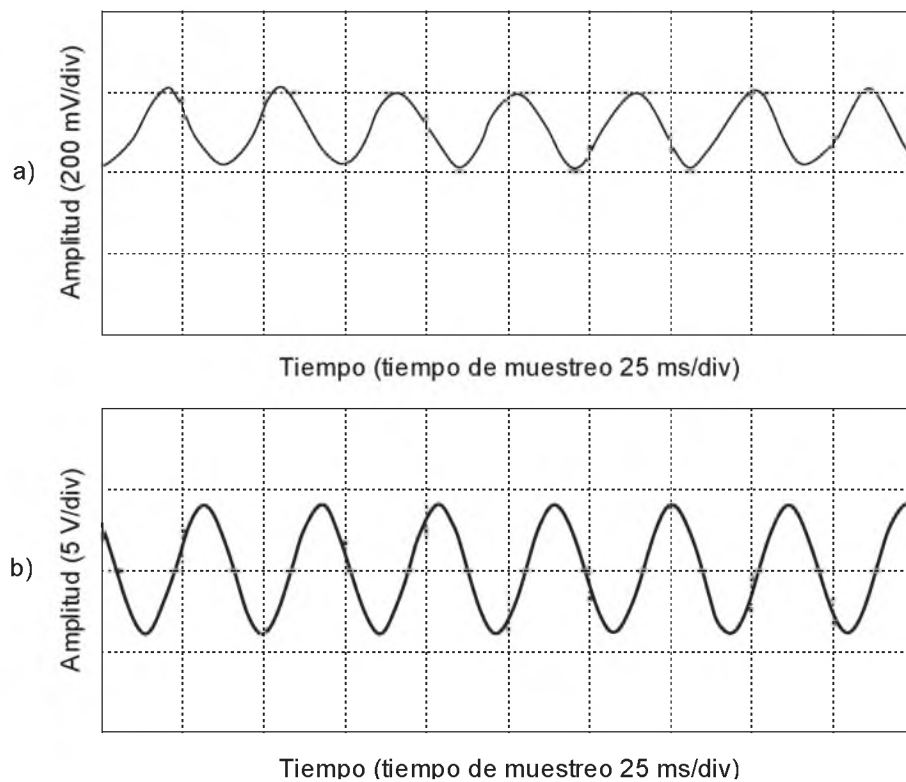


Figura 5.9. Comparación de la frecuencia de vibración producida en la fibra óptica por la placa de Chladni a 28.57 Hz. a) Señal de salida del interferómetro, b) frecuencia de vibración de la placa de Chladni.

Por otra parte a una distancia de separación del cono de resonancia y la placa de Chladni de 1.5 cm y a una frecuencia de vibración de 322.6 Hz se obtuvo el resultado mostrado en la figura 5.10. Nuevamente se observa una similitud en frecuencia de vibración entre las señales aunque con una amplitud menor en el caso de la señal de vibración de la fibra obtenida a la salida del interferómetro.

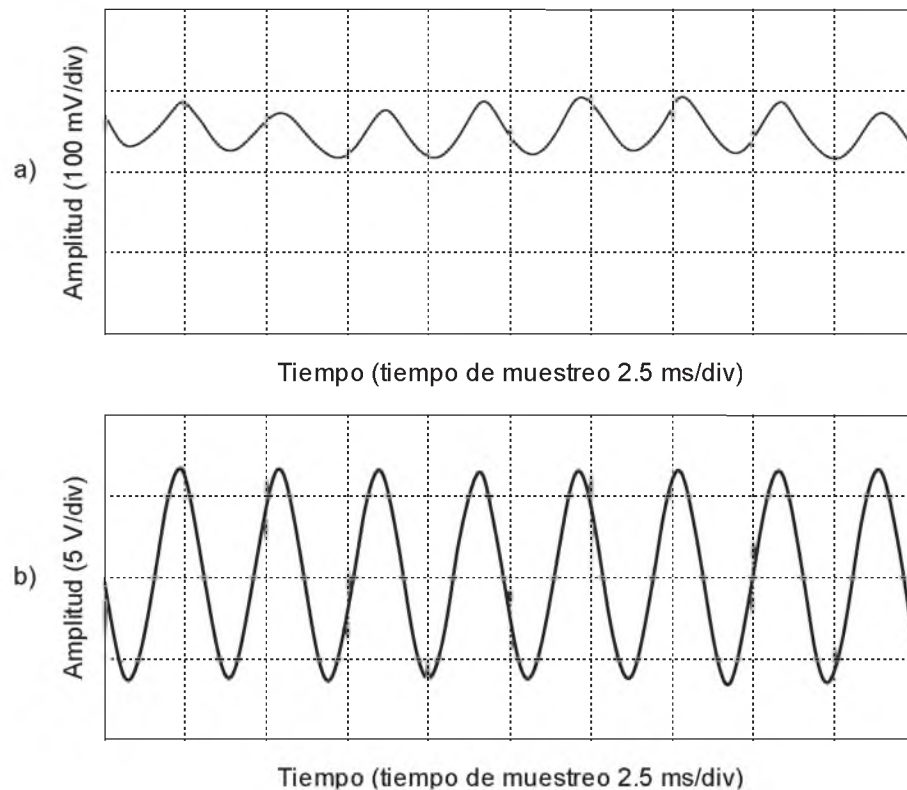


Figura 5.10. Comparación de la frecuencia de vibración producida en la fibra óptica por la placa de Chladni a 322.6 Hz. a) Señal de salida del interferómetro, b) frecuencia de vibración de la placa de Chladni.

En este prototipo cabe resaltar que presento resultados interesantes, pero debe ser perfeccionado y estudiado más a fondo. Para lograr conseguir un sensor para monitorear bajas y altas frecuencia con una amplitud aceptable.

En general, como el análisis de vibraciones en maquinarias se basa en el hecho de que en muchos casos es posible relacionar la falla de la máquina con la frecuencia de vibración mientras que la amplitud de la misma puede dar una indicación de la severidad del problema [43], los resultados obtenidos se encaminan hacia la solución de estrategias de mantenimiento de maquinarias basadas en el monitoreo de vibraciones. Para obtener un indicador de la condición de la máquina se necesita transformar una cantidad alta de muestras de la señal de vibración para obtener rasgos invariantes en el tiempo. La magnitud en la cual un rasgo individual puede proporcionar información útil, depende de la señal que se está analizando y, por tanto, de la maquinaria y del tipo de fallo que esta presenta [44]. Aparte se conoce que la mayoría de los equipos que operan en las industrias tales como, equipos mecánicos, eléctricos, rotatorios, etc., trabajan a frecuencias menores a 50 Hz y que muchos de ellos deben ser monitoreados [45].

#### **5.4 Desarrollo de un sensor bajo la técnica de plasmones superficiales (SPR) empleando el interferómetro de Sagnac de fibra**

Los sensores fotónicos han sido objeto de intensa investigación durante los últimos dos decenios. Dentro de este campo en rápido progreso, la investigación se está centrando en el desarrollo de sensores plasmónicos con una mayor sensibilidad. Al tratar de aumentar la sensibilidad se han empleado fundamentalmente dos estrategias: la modificación de las propiedades físicas del plasmón superficial (intensidad del campo electromagnético, distancia de propagación y distancia de penetración) y el desarrollo de nuevas técnicas sensoras basadas en plasmones superficiales. En esta última estrategia las técnicas interferométricas al demostrar ser extremadamente sensibles permitieron la creación de dispositivos ópticos interferométricos de Resonancia de Plasmón Superficial (SPR, del inglés Surface Plasmon Resonance) de tipo intrínseco y extrínseco; es decir, basados en la interferencia directa de dos plasmones superficiales [46, 47, 48] o en la interferencia de una señal SPR con alguna señal de referencia. En el caso intrínseco, el esquema interferométrico de Sagnac de fibra óptica estudiado es una clara alternativa cuando se habla de una fusión con un SPR cuyo desarrollo tecnológico en un futuro darán lugar a nuevas soluciones en diferentes campos como la medicina, química, ingeniería, etc.

El esquema que se ha contemplado se muestra en la figura 5.11. En el interferómetro de Sagnac, se colocará dentro del lazo un sensor de fibra óptica bajo la técnica SPR. Se espera conseguir mejorar las características de respuesta aplicándole un estado de polarización en particular. Este arreglo interferométrico permitirá cambiar los estados de polarización que se presentan en el sensor SPR y observar su comportamiento. Como dos haces se contra-propagan en el lazo, estos pueden tener polarizaciones iguales o diferentes dependiendo si se coloca una o dos QWP.

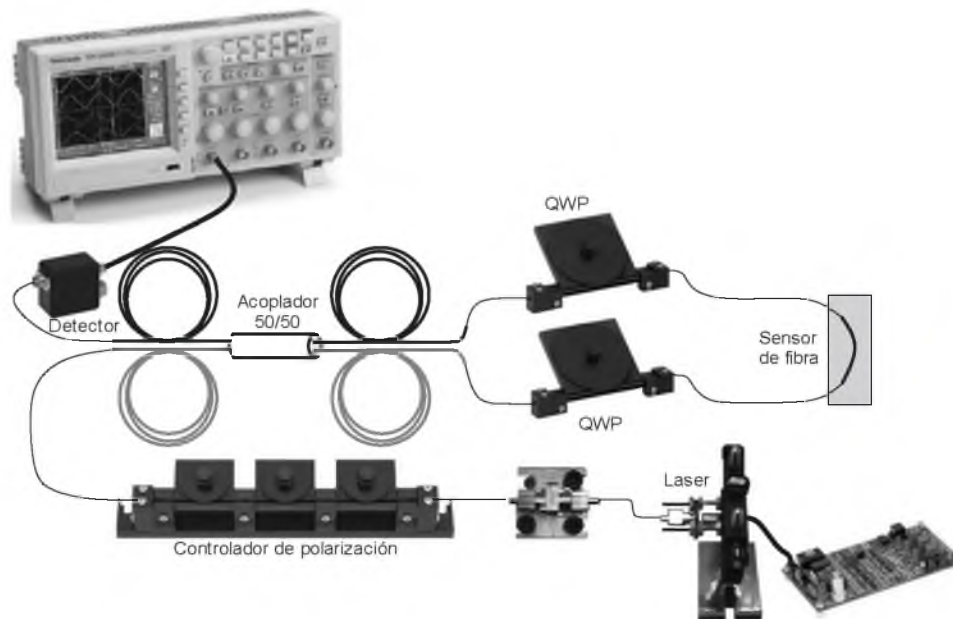


Figura 5.11. Arreglo experimental propuesto. El sensor SPR de fibra se coloca en el lazo de fibra que forma el interferómetro y experimenta dos estados de polarizaciones iguales o diferentes dependiendo si se coloca una o dos QWP.

El sensor SPR de fibra óptica será un sistema de tres capas que consiste en un núcleo de la fibra y dos elementos metálicos de transición que sean estables por si mismos sin necesidad de una reacción con otro elemento. Del cual la propiedad óptica de los recubrimientos metálicos es explicada por el modelo de plasma, tomando en cuenta que el plasma es un conjunto de partículas que presentan una dinámica colectiva, donde oscilaciones colectivas de los portadores de carga del sistema son denominadas oscilaciones de plasma. Razón por la cual un plasmón de superficie es una cuantización de la oscilación del plasma generado en la interface metal-dieléctrico y excitada mediante electrones [49, 50], fonones [51] o fotones [52]. Precisamente mediante esta última forma de excitación cabe destacar los primeros montajes experimentales para la excitación de plasmones de superficie propuestos en 1968 por Otto [53] y Kretschmann-Raether [54].

Dentro de estos esquemas de excitación, la luz también puede provenir de guías de ondas como las fibras ópticas. El depósito de las capas metálicas altamente reflexivas (por ejemplo una capa de oro o plata con espesor de 40-50 nm, y otra que sirva de protección a la oxidación, como óxido de zirconio con espesor de 5-15 nm) sobre el núcleo de la fibra óptica (sensor SPR de fibra óptica) y el ajuste de sus espesores e índices de refracción, puesto que en las partículas metálicas, la longitud de onda a la que existen los plasmones superficiales localizados (longitud de onda del plasmón) depende del tipo de metal, del tamaño de la partícula y de la forma de ésta. Es posible que para estas longitudes de onda, el campo electromagnético este localizado alrededor de la superficie del metal, entonces cuando una luz con longitud de onda igual a la de los plasmones superficiales localizados incida sobre la partícula metálica y produzca un efecto resonante, los electrones libres responderán colectivamente oscilando en resonancia a la misma frecuencia que la luz incidente asociando un aumento enorme de la intensidad del campo electromagnético en las proximidades de la partícula. De ahí que a la creación o excitación de plasmones superficiales mediante luz se la denomine usualmente SPR.

Precisamente con este fenómeno, el sensor SPR detecta cambios mínimos en el índice de refracción de la superficie de detección y de su vecindad inmediata. Esta detección altamente sensible se basa en la excitación colectiva de los electrones (los plasmones superficiales) en una película metálica, conduciendo a una absorción total de la luz en un ángulo de incidencia (ángulo de resonancia en el cual se origina el acoplamiento máximo entre la luz incidente y las ondas de plasmones superficiales) dado por la condición de resonancia, que es dependiente de los índices de refracción de cualquiera de los lados de la película metálica. Así, el índice de refracción de la capa de detección y de la capa adyacente a ella se puede medir inmediatamente como un cambio en el ángulo de absorción total de la luz. Por lo tanto este sensor SPR es muy sensible en la detección de cambios de índice de refracción del orden de  $10^{-5}$  [55].

En otras palabras se proyecta investigar, estudiar y desarrollar un sensor SPR de fibra óptica monomodo, para conseguir un modo guiado cuyo índice efectivo satisfaga la condición de SPR de la capa metálica y que produzca una transferencia de energía desde el modo guiado al modo plasmónico. El sensor se fabricará, con los parámetros óptimos sugerido por una simulación teórica. La simulación, proporcionará el espesor óptimo en los elementos metálicos a elegir y bajo qué condiciones se puede lograr la puesta a punto del sensor en la longitud de onda de la resonancia.

Este tipo de trabajo sobre la propagación de la luz a través de una fibra óptica recubierta por unas capas metálicas ha sido estudiado en varios trabajos previos [3, 56, 57, 58, 59]. A diferencia es que en esta configuración el modelo a analizar es en fibra monomodo y el SPR podrá ser excitado por dos rayos controlados con polarizaciones iguales o diferentes, como se muestra esquemáticamente en la figura 5.12, representando la sección del lazo que incorpora el sensor SPR.

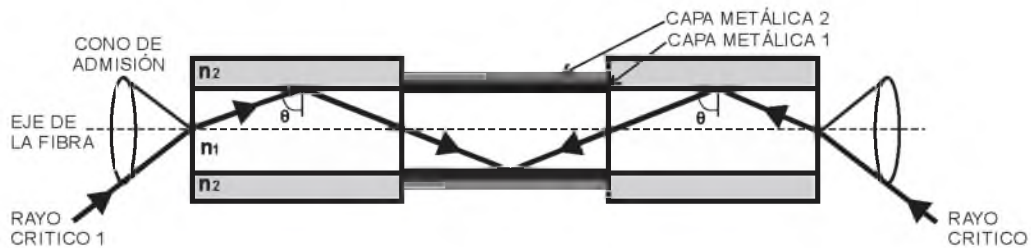


Figura 5.12. Dos rayos meridionales en una guía, excitando un sensor SPR para aumentar su sensibilidad.

## 5.5 Conclusiones finales

En la elaboración de este trabajo de tesis se obtuvieron una serie de resultados interesantes, en el camino de alcanzar el objetivo, muchas ideas empezaron a surgir. Las cuales fueron producto del desarrollo progresivo y de la solución de los problemas suscitados. A continuación se puntualizan brevemente los aspectos más relevantes, así como las posibles líneas de investigación y desarrollo a futuro.

- La fibra óptica poseen características favorables vistas en sus propiedades. Donde estas están sujetas continuamente a perturbaciones de varias clases que afectan en mayor o menor medida la propagación de luz. Por consiguiente el estudio de características particulares de configuraciones basadas en fibra óptica, hace posible su integración como elemento sensorial en los sistemas mecatrónicos, para crear sistemas aún más precisos, inteligentes, autónomos y de mejor funcionamiento.
- Se justificó, teórica y experimentalmente, que la polarización e interferencia es de importancia para el mejor desempeño del interferómetro. Motivo por la cual se montaron y explicaron los diferentes arreglos, mostrando resultados interesantes como el obtenido al incluir la QWP en el lazo, además se mencionaron los desarrollos experimentales previos, que fortalecieron el conocimiento así como extendieron la perspectiva y comprensión en este campo de estudio.
- Se efectuó un análisis numérico donde la comparación de resultados, verifica y valida los resultados experimentales, demostrando la fiabilidad de los sistemas al mejorar su respuesta con ajustes en el control de polarización a la entrada y la QWP.

- Se realizaron experimentos satisfactorios con dos prototipos basados en el interferómetro de Sagnac de fibra óptica con el objetivo de innovar el área de aplicación. Se demostró experimentalmente que el interferómetro funciona de manera óptima como un sistema de control manual que puede ser empleado en sistemas de navegación automático. Así también se presentó un sistema de monitoreo de vibraciones no invasivo que demostró su eficacia al detectar la vibración de un mecanismo a una distancia de 1.5 cm (322.6 Hz) y 2 cm (28.57 Hz). Por ello este sistema están en desarrollo con miras a poder detectar vibraciones en una máquina y poder ser empleado en la maquinaria de las maquiladoras de esta ciudad.
- Se dio a conocer el potencial de usar dos QWP en el lazo del interferómetro cuya función es un recorrido de dos estados de polarización iguales en el lazo.
- En cuanto a las líneas de trabajo futuro, se mostraron tres aplicaciones sin llegar a un diseño terminado, estas deberán estar orientadas a mejorar las características y elementos que ayudan a ser posible el procesos de detección. Aunque las respuestas en transmisión de los prototipos aquí expuestos son satisfactorios, aún hay que trabajar en ellos para hacerlos un sistema terminado encaminado a una posible patente.
- Otra vertiente de este trabajo será la utilización de fibra óptica que mantiene la polarización, esto junto con una técnica propia de las comunicaciones como es el multiplexado, es posible obtener mediciones y detección simultanea de un gran número de sensores de fibra a lo largo de varios kilómetros utilizando un solo sistema de monitoreo de diferentes parámetros y empleando una única fuente de entrada. Estos sensores tendrán aplicaciones tan diversas como la vigilancia de infraestructuras, detección de incendios en túneles de carretera, monitorización de líneas de ferrocarril, deformaciones en puentes, oleoductos y

almacenes temporales con carga radioactiva. Lo que constituye una poderosa herramienta en la instrumentación y control de grandes procesos y estructuras.

- Esta línea de investigación es muy prometedora, la FOLM, el acoplador simétrico, uno o dos QWP y los nuevos avance en los nuevos tipos de fibras ópticas, nos llevarán a múltiples aplicaciones que surgirán en diferentes campos.
- Finalmente, como resultado que contribuye a esta tesis se asistió al LVII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Física realizada en Mazatlán, Sinaloa. Participando en sesiones murales con el poster denominado "Estudio Experimental de un Sensor de Fibra con Recubrimiento de Oxido de Zirconio Dopado con Nanopartículas de Plata basado en el Interferómetro de Sagnac" obteniendo una Mención Honorífica, otorgada por la Sociedad Mexicana de Física.

## ANEXO I

# ONDAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES

De acuerdo con la dirección en la que una onda hace vibrar a las partículas del medio material, los movimientos ondulatorios se clasifican en: longitudinales y transversales [60].

**Ondas longitudinales.** El desplazamiento del medio es paralelo a la propagación de la onda (figura I.1). Tal es el caso de las ondas sonoras, las producidas por un resorte y muelle en espiral.

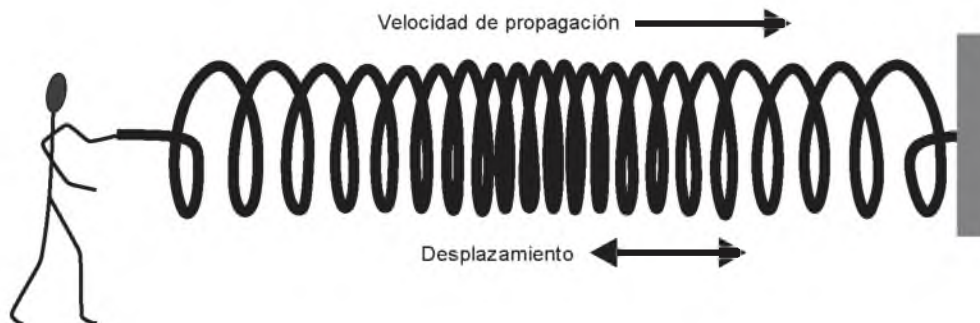


Figura I.1. Onda longitudinal producida por un muelle en espiral.

**Ondas transversales.** El desplazamiento del medio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda (figura I.2). Algunos ejemplos son las olas en un estanque, las ondas en una cuerda y la onda electromagnética.



Figura I.2. Onda transversal producida por una cuerda.

## ANEXO II

---

# EQUIPOS Y MATERIALES EMPLEADOS

---

Los principales detalles técnicos de los equipos y materiales que se utilizó para el montaje de las pruebas experimentales se describen a continuación.

- **Mesa tipo Holográfica**

Para montar el arreglo experimental se requiere de una base rígida (figura II.1a) en la que los elementos ópticos pueden ser montados y alineados de forma fiable y que cuente con una estabilidad a largo plazo además de aislar el experimento en su conjunto de las vibraciones externas. Todo esto para que los datos no sean mal interpretados y mal evaluados.

- **Empalmadora por fusión para fibra óptica TYPE39 SUMITOMO**

La figura II.1b muestra una empalmadora de fibra óptica por fusión, que es de gran importancia para realizar el empalme de los diferentes dispositivos de fibra óptica. Su ciclo de fusión es de máxima precisión y la alineación de las fibras la realiza de forma automática “núcleo contra núcleo” y dura aproximadamente 9 segundos y el modo ultrarrápido de fusión por arco eléctrico tiene un ciclo de 35 segundos. Debido a estos 2 parámetros se consigue un proceso muy eficiente en la realización de empalmes con pérdidas típicas del orden de los 0,02 dB en fibras monomodo y 0,01 en fibras multimodo. Ideales para reducir al máximo las pérdidas de nuestro sistema interferométrico.

- **Osciloscopio de cuatro canales Tektronick**

Para visualizar la amplitud de la transmisión de salida del sistema empleamos un osciloscopio de cuatro canales Tektronick (figura II.1c). Cuenta con almacenamiento removible por medio de un puerto USB para analizar los datos y graficas obtenidos de manera individual en una PC.

- **Controladores de polarización de tres paleta FPC030 Ø1.06 "(27 mm) y FPC560 Ø2.2" (56 mm)**

Un controlador de polarización de tres placas (figura II.1d). Utilizan birrefringencia inducida por estrés para crear placas de onda independientes que altera la polarización de la luz transmitida en fibra monomodo, combina una placa de cuarto de onda, placa de media onda, y la placa de cuarto de onda en serie para transformar un estado de polarización arbitraria en cualquier otro estado de polarización. La primera placa de cuarto de onda sería transformar el estado de polarización de entrada en un estado de polarización lineal. La placa de media onda giraría el estado de polarización lineal y la última placa de cuarto de onda transforma el estado lineal en un estado de polarización arbitrario. Por lo tanto, el ajuste de cada una de las tres placas (retardadores de fibra) permite el control completo del estado de polarización de salida en un amplio intervalo de longitudes de onda de 500-1600 nm).

- **Controlador de laser universal IP500**

El IP500 es un controlador universal que proporciona un máximo de 500 mA a nivel de tarjeta (figura II.1e). Este controlador puede ser configurado para operar ya sea en modo de corriente constante o potencia constante y permite ajustar la corriente límite de operación del diodo para evitar daños.

- **Detector para fibra óptica DET01CFC**

El DET01CFC está diseñado para ser usado dentro de un rango espectral de los 800 - 1700 nm de rango espectral (figura II.1f). Utiliza un elemento detector de InGaAs con base en el fotodiodo FGA01FC y cuenta con un ancho de

banda de 1,2 GHz. Opera en un rango de voltajes de salida de 0 a 10 volts que pueden ser visualizados directamente en un osciloscopio.

- **Acoplador de fibra óptica 50/50 a una longitud de onda de 980 nm (FC980-50B).**

El acoplador de fibra óptica es necesario para implementar el interferómetro de fibra, tiene una razón de potencia dividida de 50/50 y opera con una longitud de onda de 980 nm (figura II.1g). Este es construido al fusionar dos fibras con las mismas características para formar un elemento con cuatro puertos por lo que al entrar, por ejemplo, un haz de luz de 10 mW por uno de sus puertos, la razón de acoplamiento dividiría el haz en dos de 5 mW cada uno por los puertos contrarios. Su construcción puede combinar y/o separar el haz o haces de luz.

- **Diodo laser L980P010 a una longitud de onda de 980 nm.**

El diodo láser (figura II.1h) es de baja potencia (10 mW) a una longitud de onda de 980 nm (970 nm - 990 nm). Cuando opera dentro de sus especificaciones, tienen una vida útil extremadamente larga. El haz de luz que emite es ampliado más no puntual por lo que es necesario una lente colimadora para poder introducir la máxima cantidad de luz a la fibra óptica.

- **Fibra óptica monomodo SMF28 a una longitud de onda de 980 nm.**

La fibra óptica monomodo (figura II.1i) se emplea para formar el lazo y brazos del interferómetro, tiene un alto rendimiento en un amplio rango espectral y también cuenta con un núcleo de  $8.2 \mu\text{m}$ , el diámetro del revestimiento es de  $125 \pm 0.7 \mu\text{m}$  y el del recubrimiento de  $245 \pm 5 \mu\text{m}$ .



Figura II.1. a) Mesa tipo Holográfica, b) Empalmadora para fibra óptica, c) Osciloscopio, d) Controladores de polarización de tres paletas (27 mm y 56 mm), e) Controlador de láser, f) Detector para fibra óptica, g) Acoplador de fibra óptica 50/50 a una longitud de onda de 980 nm, h) Diodo láser a una longitud de onda de 980 nm, i) Fibra óptica monomodo a una longitud de onda de 980 nm.

## ANEXO III

# ELABORACIÓN DEL QWP

El QWP es un dispositivo controlador de polarización de una paleta (placa) completamente equivalente a la placa de onda fraccionaria de la óptica clásica y es derivado del principio de funcionamiento descrito por Lefevre del controlador de tres patetas para su uso con fibra óptica monomodo [61]. La paleta consiste en una bobina de fibra donde el radio R y el número de vueltas N determinan el cambio de fase. La bobina introduce la birrefringencia inducida por el estrés por flexión de la fibra y por lo tanto un cambio en el índice de propagación y de ahí la fase de dos polarizaciones ortogonales. La diferencia del índice se convierte en

$$\Delta_n = a \left( \frac{r}{R} \right)^2, \quad (3.15)$$

Con  $a=0.133$  y  $r$  es el radio del núcleo. Por lo tanto, la diferencia de longitud de trayectoria es

$$\Delta_n \cdot 2\pi NR = \frac{\lambda}{m}, \quad (3.15)$$

Donde  $m$  es 4 de acuerdo con el desplazamiento de fase. El radio de la bobina es entonces dado por

$$R = \frac{2\pi ar^2}{\lambda} Nm. \quad (3.15)$$

La rotación de la bobina, como se ilustra en la figura III.1 hará rotar el eje rápido y lento de la bobina, realizando así una fase fija, rotando la paleta de onda.

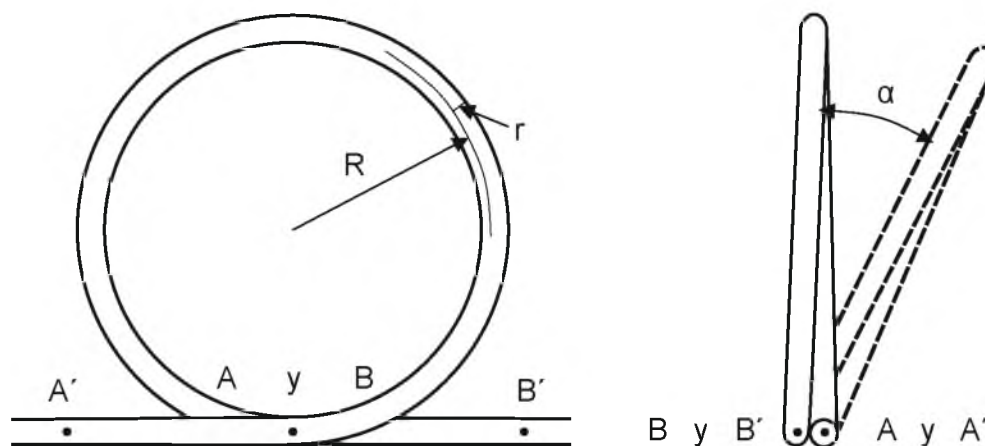


Figura III.1. Vista lateral y axial de la QWP.

---

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Gutiérrez Z. Francisco, "*Investigación del espejo de lazo óptico no lineal para aplicaciones en láseres sintonizables de fibra*", Tesis de doctorado, INAOE (2005).
- [2] A. González-García, O. Pottiez y R. Grajales-Coutiño. *Estudio experimental de un láser sintonizable en longitud de onda usando un filtro de Sagnac con selectividad espectral mediante cambios en la temperatura*. Rev. Mex. Fís., 56(4) 275-280, 2010.
- [3] Sachin K. Srivastava, Banshi D. Gupta. *Fiber Optic Plasmonic Sensors: Past, Present and Future*. The Open Optics Journal, Volume 7, 2013.
- [4] Patrick Uebel, *Metal Filled Optical Fibers Photonics and Plasmonics on the Nanoscale*, Dissertation im fachbereich Physik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Juli 2013.
- [5] N. J. Doran, D. Wood. *Nonlinear optical loop mirror*. Opt. Lett. 13, (1988), 56-58.
- [6] J.D. Moores, K. Bergman, H.A. Haus, and E.P. Ippen, J. Opt. Soc. Am. B 8 (1991) 594.
- [7] Jinno Masahiko and Takao Matsumoto, Journal of Quantum Electronics 28 (1992) 875.
- [8] Grupo de Desarrollo Regional del Tecnológico de Monterrey. *Las megatendencias tecnológicas actuales y su impacto en la identificación de oportunidades estratégicas de negocios*. Primera Edición, 2009.
- [9] Leopoldo Rene Villarreal Jiménez, "*Sistemas de comunicación a través de fibras ópticas*", Tesis de maestría, San Nicolás de los Garza, Universidad autónoma de nuevo león, Junio de 1997.
- [10] Gerd Keiser. *Optical Fiber Communications*. Second Edition, McGraw-Hill, Inc., 1991.

- [11] Fedor Mitschke. *Fiber Optics Physics and Technology*. Springer 2009.
- [12] Charles M. Davis, Edward F. Carome, Martin H. Weik, Shaoul Ezekiel, Robert E. Einzig. *Fiberoptic Sensor Technology Handbook*. Optical Technologies (OPTECH) Inc., 1982; 1986.
- [13] Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communications Systems*. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [14] Keigo Iizuka. *Engineering Optics*. Third Edition, Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [15] F. Poletti, N. V. Wheeler, M. N. Petrovich, N. Baddela, E. Numkam Fokoua, J. R. Hayes, D. R. Gray, Z. Li, R. Slavík & D. J. Richardson. *Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum*. *Nature Photonics* 7, 279–284 (2013).
- [16] John Crisp, Barry Elliott. *Introduction to Fiber Optics*. 3rd Edition, Elsevier, 2005.
- [17] David Bailey, Edwin Wright. *Practical Fiber Optics*. First published, Elsevier, 2003.
- [18] Harry J. R. Dutton. *Understanding Optical Communications*. First Edition, IBM Corp. 1998.
- [19] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*. 7th ed., Cambridge University Press, New York, 1999.
- [20] Govind P. Agrawal. *Applications of Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, San Diego, CA, 2001.
- [21] Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Third Edition, Academic Press, San Diego, CA, 2001.
- [22] Elena Garcia, “*La luz. Naturaleza y propagación*”, Notas, c/Génova, 7-2° • 28004 Madrid (02/07).
- [23] Justiniano Casas Peláez. *Óptica*. Sexta Edición, 1985.
- [24] Eugene Hecht. *Óptica*. Tercera Edición, Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, 2000.
- [25] B. Ibarra-Escamilla, E. A. Kuzin, O. Pottiez, J. W Haus, F. Gutierrez-Zainos, R. Grajales-Coutiño, P. Zaca-Moran. *Fiber optical loop mirror with a*

- symmetrical coupler and a quarter-wave retarder plate in the loop.* Optics Communications 242 (2004) 191-197.
- [26] H. H. Cerecedo-Nuñez, E.A. Kuzin. *Breve revisión del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia.* Rev. Mex. Fís., 46(5) 512-517, 2000.
- [27] E. Kuzin, M. Ramírez Renero, B. Ibarra Escamilla, J. Sánchez-Mondragón, H. Cerecedo Nuñez. *Interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente y torcida en lazo.* Rev. Mex. Fís., 43(3) 374-380, 1997.
- [28] W. Eickhoff. Opt. Lett. 6 (1981) 204.
- [29] Gladys Adriana Quintero Rojas. *Respuesta Óptica utilizando un Interferómetro de Sagnac.* Rev. Investigaciones Aplicadas ISSN 2011-0413 Medellín-Colombia Vol. 4, No. 1. PP 12-17, 2010.
- [30] D. Monzón, A. N. Starodumov, L. A. Zenteno, A. Boyain y Goitia. E. De La Rosa. *Interferómetro de Sagnac con selectividad espectral.* Rev. Mex. Fís., 43(6) 972-980, 1997.
- [31] B. A. Villagómez-Bernabe, E. A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla, N. Korneev. *Estudio sobre la influencia de birrefringencia circular y dispersión Raman estimulada en el funcionamiento del interferómetro Sagnac.* Morelia, Michoacán, OF-1-RAO-2012.
- [32] P. Hariharan. *Optical Interferometry.* Second Edition, Academic Press, San Diego, CA, 2003.
- [33] G. Sagnac, "L'ether lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme," C. R. Acad. Sci. (Paris) 157, pp. 708-710, 1913.
- [34] R. Anderson, H. R. Bilger, G. E. Stedman "Sagnac" effect: A century of Earth-rotated interferometers Am. J. Phys, Vol. 62, No. 11, November 1994.
- [35] Vali, V., and R.W. Shorthill, "Fiber Ring Interferometer," Applied Optics, Vol. 15, 1976, pp. 1099-1100 (SPIE, MS8, pp. 135-136).
- [36] A. Flores-Rosas, E. A. Kuzin, B. Ibarra Escamilla y M. Bello-Jiménez *Eliminación de ruido de ASE en una fibra dopada con erbio empleando un filtro basado en el interferómetro de Sagnac con fibra de Hi-Bi en el lazo.*

- Rev. Mex. Fís., 54(2) 130-134, 2008.
- [37] D. B. Mortimore, *Journal of lightwave technology*, 6, No. 7, 1217-1224, 1988.
- [38] Diana Tentori, A. Garcia-Weidner, M. Farfan-Sanchez. *Birrefringencia de jones en fibras ópticas torcidas*. Morelia, Michoacán, FO-1-RAO-2012-1.
- [39] O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla, J. T. Camas-Anzueto y F. Gutierrez-Zainos. *Easily tunable nonlinear optical loop mirror based on polarization Asymmetry*. Optical Society of America. Vol. 12, No. 16. (2004), 3878-3887.
- [40] J. M. Estudillo-Ayala, E. A. Kuzin y B. Ibarra-Escamilla. *Teoría del interferómetro de Sagnac de fibra de baja birrefringencia y torcida*. Rev. Mex. Fís., 47(3) 271-274, 2001.
- [41] B. Ibarra-Escamilla, E. A. Kuzin, F. Gutierrez-Zainos, R. Tellez-Garcia, J. W. Haus, R. Rojas-Laguna, J. M. Estudillo-Ayala. *Measurement of beat length in short low-birefringence fibers using the fiber optical loop mirror*. Optics Communications 217 (2003) 211-219.
- [42] P. McIntyre and A. W. Snyder, J. Opt. Soc. Am., 68, 149, (1978).
- [43] Kulichevsky R., Sacchi M., Martín Ghiselli A. *Medición y análisis de vibraciones: Una herramienta para la predicción y evaluación de fallas en maquinarias*. U. A. ENDE- Comisión Nacional de Energía Atómica, San Martín, Buenos Aires, Argentina.
- [44] F. E. Hernández Montero, E. Palomino Marín, V. Atxa Uribe, M. Luis Ruiz Barrios. *Análisis de vibraciones para el diagnóstico aplicando procesamiento estadístico de orden superior*. Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Ciudad de La Habana, Cuba. Vol. 7, núm. 2, mayo-agosto, 2004, pp. 75-80.
- [45] Arturo Ruiz R., Guillermo Silva P., Sergio R. Rojas R. y Noé Vidal M. *Calibración de transductores de vibración de baja frecuencia utilizando un interferómetro michelson en cuadratura*. Centro Nacional de Metrología, División de Vibraciones y Acústica. El Marqués, Querétaro, México. Octubre 2004.
- [46] P. Debackere, S. Scheerlinck, P. Bienstman, and R. Baets, "Surface

- plasmon interferometer in silicon-on-insulator: novel concept for an integrated biosensor,* Opt. Express 14, 7063-7072 (2006) [doi:10.1364/OE.14.007063].
- [47] P. Debackere, R. Baets, and P. Bienstman, "Bulk sensing experiments using a surface-plasmon interferometer," Opt. Lett. 34, 2858-2860 (2009) [doi:10.1364/OL.34.002858].
- [48] Q. Gan, Y. Gao, and F. J. Bartoli, "Vertical Plasmonic Mach-Zehnder interferometer for sensitive optical sensing," Opt. Express 17, 20747-20755 (2009) [doi:10.1364/OE.17.020747].
- [49] T. Wang, E. Boer-Duchemin, Y. Zhang, G. Comtet, and G. Dujardin, "Excitation of propagating surface plasmons with a scanning tunnelling microscope," Nanotechnology 22, 175201 (2011) [doi:10.1088/0957-4484/22/17/175201].
- [50] P. Bharadwaj, A. Bouhelier, and L. Novotny, "Electrical Excitation of Surface Plasmons," Phys. Rev. Lett. 106, 226802 (2011) [doi:10.1103/PhysRevLett.106.226802].
- [51] B. Diaconescu, K. Pohl, L. Vattuone, L. Savio, P. Hofmann, V. M. Silkin, J. M. Pitarke, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, et al., "Low-energy acoustic plasmons at metal surfaces," Nature 448, 57-59 (2007) [doi:10.1038/nature05975].
- [52] H. Raether, *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*, Springer (1988).
- [53] A. Otto. *Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection*. Zeitschrift for Physics. 216, 398-410, 1968.
- [54] E. Kretschmann, H. Raether. *Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light*. Z. Naturforsch. A 23, 2135-2136, 1968.
- [55] R. P. H. Kooyrnan, "Surface Plasmon Resonance, Instrumentation" Spatially Resolved Spectroscopy Analyses, Ed. Academic Press (1999), pp. 1-9.
- [56] Yong Chen, Rongsheng Zheng, Yonghua Lu, Pei Wang, and Hai Ming. *Fiber-optic surface plasmon resonant sensor with low-index anti-oxidation coating*. Chinese Optics Letters. Vol 9(10), 100605(2011).

- [57] Rajneesh K. Verma and Banshi D. Gupta. *Surface plasmon resonance based fiber optic sensor for the IR region using a conducting metal oxide film*. J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 27, No. 4/ April 2010.
- [58] Rajneesh K. Verma. *Fabrication and Characterization of SPR Based Fiber Optic Probe Using e beam Deposition*. Sensors & Transducers, Vol. 182, Issue 11, November 2014, pp. 53-56.
- [59] Cedric Perrotton, Martin Slaman, Nicolas Javahiraly, Herman Schreuders Bernard Dam, and Patrick Meyrueis. *Wavelength response of a surface plasmon resonance palladium-coated optical fiber sensor for hydrogen detection*. Optical Engineering 50(1), 014403 January 2011.
- [60] Héctor Pérez Montiel. *Física general*. Publicaciones cultura. Décima quinta reimpresión México, 2000.
- [61] H. C. Lefevre, *Single-modo fibre fractional wave devices and polarisation controllers*, Electronics Letters, Vol. 16, no. 20, pp. 778 – 780, 1980.