

TESIS DEFENDIDA POR

Verónica Alejandra Patrón Aguilar

Y aprobada por el siguiente comité:

Dr. Anatolii Khomenko Filatova

Director del Comité

Dr. Heriberto Márquez Becerra

Miembro del Comité

Dra. Elena Tchaikina Kolesnikova

Miembro del Comité

Dr. Alfonso García Weidner

Miembro del Comité

Dr. José Rosario Gallardo López

Miembro del Comité

Dr. Roger Cudney Bueno

*Coordinador del Posgrado en
Óptica*

Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla

*Director de Estudios
de Posgrado*

11 de Octubre de 2006

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ÓPTICA CON ORIENTACION EN OPTOELECTRÓNICA

**Sensor dual de fibra óptica basado en interferometría de baja
coherencia**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

presenta:

Verónica Alejandra Patrón Aguilar

Ensenada, Baja California a Octubre de 2006.

RESUMEN de la tesis de **Verónica Alejandra Patrón Aguilar**, presentada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ÓPTICA con orientación en OPTOELECTRÓNICA. Ensenada, Baja California, Octubre de 2006.

Sensor dual de fibra óptica basado en interferometría de baja coherencia

Resumen aprobado por:

Dr. Anatolii Khomenko Filatova

Director de Tesis

El presente trabajo de tesis comprende el desarrollo y estudio de un sensor dual de fibra óptica basado en la interferometría de baja coherencia. El sensor consiste en dos interferómetros de Sagnac de fibra óptica conectados en serie, lo cual permite realizar mediciones en dos puntos simultáneamente. El lazo de fibra de cada interferómetro está elaborado con una sección de fibra óptica altamente birrefringente que sirve como el elemento sensible del sensor. El método de procesamiento para cada uno de los sensores del sensor dual fue desarrollado en esta tesis, basándose en la técnica conocida como procesamiento de señales en el dominio espectral.

Se desarrolló un simulador numérico de un sensor individual y también para un sensor dual. Se muestra una coincidencia en los resultados obtenidos por simulación numérica de un sensor individual y los obtenidos experimentalmente. Este resultado nos permitió utilizar el simulador para desarrollar el método de procesamiento de señales para el sensor dual y su optimización.

Se desarrolló un prototipo experimental del sensor dual. El prototipo fue utilizado para la investigación experimental de la posibilidad de uso del sensor dual como un sensor de humedad relativa de fibra óptica que utiliza la técnica del método psicrométrico de bulbo húmedo/bulbo seco.

Palabras clave: Sensores de fibra óptica, interferometría de baja coherencia, mediciones de humedad.

ABSTRACT of the thesis presented by **Verónica Alejandra Patrón Aguilar**, as a partial requirement to obtain the SCIENCE MASTER degree in OPTICS with orientation in OPTOELECTRONIC. Ensenada, Baja California, October 2006.

Fiber optic dual sensor based on low coherence interferometry

Abstract approved by:

Dr. Anatolii Khomenko Filatova

Thesis director

This thesis work comprises the development and study of a fiber optic dual sensor based on low coherence interferometry. The sensor consists in two fiber optic Sagnac interferometers connected in series, which allows to perform measurements in two different points simultaneously. Each interferometer is a high birefringence fiber optic coil that acts as the sensitive element of the sensor. The processing method for each fiber optic coil of the sensor was developed in this thesis, based on the technique known as spectral domain signal processing.

A numeric simulator was developed for an individual sensor and also for a dual sensor. A coincidence is shown between the results obtained with the numeric simulator for an individual sensor and the experimental results. This allowed to use the simulator to develop a signal processing method for the dual sensor and its optimization.

In this thesis is presented an experimental prototype of a dual sensor. This prototype was used for an investigation in order to analyze the possibility to use the dual sensor as a fiber optic relative humidity sensor that utilizes the wet and dry bulb instrument method.

Keywords: Fiber optic sensors, low coherence interferometry, humidity measurements.

A mis padres:

Verónica y Eduardo

A mis hermanos:

Eduardo y Emiliano

Agradecimientos

Al Dr. Anatolii Khomenko Filatova, por su apoyo y dirección en la realización de esta tesis. Gracias por su paciencia y por todos los conocimientos que me brindó. Fue un placer conocerlo y trabajar con usted.

A los miembros del comité de tesis: Dra. Elena Tchaikina, Dr. Heriberto Márquez, Dr. Alfonso García, Dr. Jose Rosario Gallardo; por sus críticas, ideas y aportaciones en el desarrollo de esta tesis.

Al técnico Marco Antonio García por todo su apoyo y su valiosa ayuda en los experimentos y obtención del equipo necesario para los mismos.

A los directivos, secretarias y a todo el personal del departamento de óptica por haberme apoyado directa o indirectamente durante el transcurso de estos dos años de estudios.

A mis compañeros de generación: Gerardo, Daniel, Teth, Rodrigo, José Daniel, Joel, Francisco, Yasser, César, Karina, Norma y Noemí; por su apoyo y compañerismo.

A aquellos que fueron mis grandes amigos, gracias por alegrar mis días en este centro de investigación, por su amistad dentro y fuera de las aulas y laboratorios, nunca los olvidaré.

A Daniel Barocio, mi compañero de estudios, mejor amigo y mi apoyo en todo momento. Gracias de todo corazón.

Al CICESE por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado haciendo uso de la matrícula 032321018.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado.

Ensenada, México
11 de Octubre de 2006.

Verónica Alejandra Patrón Aguilar

Contenido

Capítulo / Sección	Página
Contenido	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Agradecimientos	v
Lista de Figuras	viii
I Introducción	1
I.1 Metas y Objetivos	2
I.2 Contenido de tesis	3
II Fibras Ópticas	5
II.1 Introducción	5
II.2 Principios de transmisión de la luz en las fibras ópticas	6
II.3 Tipos de Fibras Ópticas	8
II.3.1 Fibras de índice escalonado.	9
II.3.2 Fibras de índice graduado.	10
II.4 Atenuación y dispersión en las fibras ópticas	11
II.4.1 Atenuación	11
II.4.2 Atenuación de la luz en vidrio	13
II.4.3 Dispersión	15
II.5 Birrefringencia	18
II.5.1 Efecto de birrefringencia en las fibras ópticas	19
II.5.2 Birrefringencia Geométrica	20
II.5.3 Birrefringencia inducida por tensión elástica	22
III Sensores de Fibra Óptica	24
III.1 Introducción	24
III.2 Estructura de un sensor de fibra óptica	25
III.2.1 Fuentes de luz	26
III.2.2 Detectores	28
III.3 Tipos de sensores de fibra óptica	28
III.4 Sensores Interferométricos	29
III.5 El interferómetro de Sagnac y sus aplicaciones	30
III.6 Interferometría de Baja coherencia	32
III.6.1 Procesamiento en el dominio de fase	36
III.6.2 Procesamiento en el dominio espectral	37
III.7 Sensores con fibras altamente birrefringentes	40
III.8 Características de un sensor	41
IV Sensor de temperatura elaborado con un lazo de Sagnac	43

Contenido (continuación)

Capítulo / Sección	Página
IV.1 Introducción	43
IV.2 Sensor de temperatura compuesto por un lazo de Sagnac	44
IV.2.1 Principios del funcionamiento del interferómetro de Sagnac	44
IV.2.2 Arreglo Experimental	49
IV.2.3 Simulación	50
IV.2.4 Procesamiento de la señal	55
IV.3 Medición de la sensibilidad e incertidumbre del sensor de temperatura	56
IV.4 Conclusiones	60
V Sensor dual elaborado con dos lazos de Sagnac	61
V.1 Introducción	61
V.2 Arreglo experimental	62
V.3 Simulación	63
V.4 Procesamiento de señales	65
V.5 Resultados experimentales	69
VI Conclusiones	78
Literatura citada	81
A Programas de simulación y procesamiento de señales	83
A.1 Simulación de la señal de salida de un sensor de temperatura formado por lazo de Sagnac de fibra birrefringente	83
A.2 Procesamiento de la señal de salida de un sensor de temperatura formado por lazo de Sagnac de fibra birrefringente	85
A.3 Simulación de un sensor de humedad formado por dos lazos de Sagnac de fibra birrefringente	91
A.4 Simulación de un sensor de humedad formado por dos lazos de Sagnac de fibra birrefringente	95
B Tabla de mediciones de humedad para un psicrómetro	102

Lista de Figuras

Figura		Página
1	Efecto de reflexión total interna dentro de una fibra óptica.	7
2	Ángulo de aceptación Θ_α de la fibra. Los rayos dentro del cono de aceptación son guiados por reflexión total interna.	8
3	Fibra con índice escalonado.	9
4	Geometría de perfiles de índice de refracción en: a) Fibra de índice escalonado multimodo, b) Fibra de índice escalonado monomodo, y c) Fibra de índice graduado multimodo (Saleh y Teich, 1991).	12
5	Dependencia del coeficiente de atenuación del silicio con la longitud de onda λ_0 . Hay un mínimo local en $1.3\mu m$ ($\alpha \approx 0.3dB/km$) y un mínimo absoluto en $1.55\mu m$ ($\alpha \approx 0.16dB/km$).	13
6	Ensanchamiento del pulso causado por la dispersión modal.	16
7	La dispersión de guía de onda compensa la dispersión cromática para producir un dispersión cero a $1.31 \mu m$ en una fibra monomodo del tipo escalonado.	18
8	Corte transversal de una fibra óptica monomodo: a) Ideal, b) Real. . .	20
9	Fibra monomodo con núcleo elíptico.	21
10	Fibra con revestimiento elíptico con birrefringencia inducida por tensión elástica.	22
11	Sección transversal de fibras con tensión asimétrica.	23
12	Esquema de un Sensor de Fibra Óptica	26
13	Arreglos interferométricos de sensores de fibra óptica	31
14	Interferómetro de Sagnac de fibra óptica como sensor de rotación . . .	32
15	Arreglo de un interferómetro de baja coherencia	33
16	Espectro de potencia producido a la salida del interferómetro.	38
17	Interferómetro de Sagnac de fibra óptica.	45
18	Acoplador direccional.	46
19	Sistema de ejes para representar el lazo de fibra altamente birrefringente torcido en $\pi/2$	48
20	Arreglo experimental de un sensor de fibra óptica para mediciones de temperatura.	49
21	Diagrama de bloques que describe el interferómetro de Sagnac.	51
22	Espectro del LED a la entrada del interferómetro.	52
23	Señal periódica obtenida del producto del vector de campo de entrada y las matrices de Jones del interferómetro.	53
24	Simulación de una Señal de salida del interferómetro de Sagnac.	53
25	Señal con ruido aditivo.	54
26	Señal y ruido aditivo cuando la señal tiene una baja intensidad de entrada.	54

Lista de Figuras (continuación)

Figura		Página
27	Interpolación de máximos y mínimos que nos da una envolvente de la señal de salida.	56
28	Espectro de salida después del procesamiento.	57
29	Resultado de simulación: Dependencia de la incertidumbre de λ con la longitud del lazo de fibra altamente birrefringente.	58
30	Ventanas de suavización.	58
31	Incertidumbre de λ respecto a la cantidad de muestras.	59
32	Arreglo experimental del sensor dual de fibra óptica.	62
33	a) Señal simulada obtenida a la salida de un sensor de dos lazos de Sagnac en serie; b) Acercamiento a la señal, en un rango de 50nm	64
34	a) Señal simulada con ruido obtenida a la salida de un sensor de dos lazos de Sagnac; b) Acercamiento a la señal, en un rango de 100nm	64
35	Señal obtenida a la salida del sensor dual de fibra óptica.	66
36	Transformada de Fourier de la señal de salida del sensor.	67
37	Filtraje de los picos que corresponden a cada sensor.	67
38	Diferencia de camino óptico tomado para 100 muestras.	68
39	Arreglo experimental para mediciones de humedad.	69
40	Temperatura ambiente vs. número de medición.	70
41	Diferencia de caminos ópticos vs. numero de medición.	71
42	Diferencia de camino óptico vs. temperatura ambiente.	72
43	Temperatura medida para los sensores 1 y 2 vs. temperatura medida por el sensor electrónico comercial.	74
44	Humedad relativa como función de la temperatura T y la diferencia en temperaturas ΔT medidos por un termómetro seco y uno húmedo.	75
45	Temperaturas medidas por los sensores 1 y 2 como función de la temperatura ambiente en el experimento de medición de humedad.	76
46	Comparación de los valores de humedad obtenidos por el sensor de fibra óptica con los datos del sensor comercial.	77

Capítulo I

Introducción

Los sensores son una parte muy importante en cualquier sistema de control. Un sensor está definido como un dispositivo que recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica. El propósito de un sensor es responder a algún tipo de propiedad física incidente y convertirlo en señal eléctrica la cual es compatible con circuitos electrónicos. Nuestro interés se encuentra en los sensores de fibra óptica, específicamente. Es bien sabido que las fibras ópticas son hoy en día una de las tecnologías para transmisión de información más eficaces y utilizadas, debido a las grandes ventajas que estas ofrecen. Simultáneamente con el desarrollo de los sistemas de comunicación por fibra óptica ha crecido la importancia de los sensores de fibra óptica. Entre las principales ventajas que estos ofrecen está la inmunidad que presentan ante los campos electromagnéticos, su aislamiento eléctrico, pasividad química, menor peso, una versatilidad geométrica que permite colocarlos en una mayor variedad de lugares, posibilidad de funcionar en ambientes agresivos, entre otras. Esta última ventaja permite utilizar los sensores en zonas con campos eléctricos y de altas temperaturas con la presencia de vapores o gases corrosivos y explosivos.

En los últimos años se han desarrollado sensores de fibra óptica para mediciones de una gran variedad de parámetros: temperatura, tensión, composición de gases, tensiones mecánicas, intensidad de la luz, campos eléctricos y magnéticos, solo por mencionar algunos. Los sensores de fibra óptica pueden ser clasificados como intrínsecos o extrínsecos. Los sensores intrínsecos son aquellos elaborados completamente de fibra,

en los cuales la perturbación óptica actúa directamente sobre la fibra y modula la señal de la luz dentro de la misma. Los sensores extrínsecos o híbridos, son aquellos donde la fibra actúa solo como un conducto para transmitir la luz hacia un dispositivo modulador de luz. Esta modulación de la luz ocurre fuera de la fibra a través de algún cambio inducido o ambiental. El funcionamiento de un sensor de fibra óptica es como sigue: la luz emitida de una fuente es acoplada mediante una interfase óptica, cuya función es la de transmitir la luz a un modulador, el cual modula la amplitud, intensidad, fase, frecuencia o polarización de la misma. Después de su paso por el modulador, la luz es guiada por otra fibra a un demodulador óptico, el cual permite convertir la señal óptica en una señal eléctrica que pueda ser procesada, registrada o exhibida para su observación. El sensor que se pretende desarrollar en el presente trabajo pertenece a los sensores intrínsecos con modulación de fase. Como es conocido en óptica, la fase puede ser medida por métodos interferométricos. En este caso, la interferometría de baja coherencia nos ofrece una técnica efectiva para este propósito.

I.1 Metas y Objetivos

Metas

- Desarrollo de nuevos métodos de procesamiento de las señales de un interferómetro dual de baja coherencia con barrido espectral.
- Desarrollo de un prototipo de un sensor dual y su optimización para mediciones más precisas de la diferencia de temperatura en dos puntos.

Objetivo de la tesis

Desarrollo e investigación de un sensor dual de fibra óptica para mediciones de humedad basado en la interferometría de baja coherencia, así como la programación del sistema encargado del análisis y procesamiento de las señales de salida del sensor.

I.2 Contenido de tesis

En el capítulo II se revisan los conceptos básicos de las fibras ópticas, sus principales características, principios de transmisión a través de fibras ópticas, así como los tipos de fibras y las principales fuentes de atenuación en las señales transmitidas a través de las mismas. Por último se describen las características de las fibras ópticas birrefringentes. En el capítulo III se presenta de manera general el concepto de sensor de fibra óptica, la clasificación de los sensores de fibra óptica de acuerdo al mecanismo de modulación empleado, la estructura de las fibras ópticas que tienen la particularidad de preservar la polarización, así como la dependencia de su birrefringencia con la temperatura. Se hace una revisión de los sensores interferométricos, así como las técnicas de interferometría de baja coherencia o interferometría de luz blanca. Se hace una breve descripción del interferómetro de Sagnac, presentando sus principales características y principios de funcionamiento. Al final de este capítulo se describen las características que debe poseer todo instrumento de medición.

En el capítulo IV se describen los principios del funcionamiento de un sensor de temperatura elaborado con un lazo de Sagnac y se muestra el arreglo experimental. Se describe el proceso de simulación del sensor y el procesamiento de las señales de salida del sensor, utilizando programas hechos en Matlab. También se muestran datos presentados en estudios previos obtenidos de manera teórica y experimental, y una comparación de estos con los resultados obtenidos por medio de simulación.

En el capítulo V se describe un sensor dual elaborado con dos lazos de Sagnac. Se

muestra el arreglo experimental, simulación, el procesamiento de señales, así como los resultados experimentales y el análisis de los mismos.

Finalmente en el capítulo VI se presentan las conclusiones.

Capítulo II

Fibras Ópticas

II.1 Introducción

En las últimas décadas, la industria de las comunicaciones ópticas ha experimentado un crecimiento fenomenal, explotando fuertemente el mercado comercial de los sistemas basados en fibra óptica. Desde su aparición a mediados del siglo XX, estas ligeras varillas de vidrio lograron desplazar al cable de cobre como el medio de transmisión en sistemas de comunicación, y en algunos casos a los satélites, esto debido a que tiene muchas ventajas con respecto a ellos y su uso se ha incrementado gradualmente. Muchas de las ventajas que ofrecen las fibras ópticas respecto a otros medios de transmisión de información es por el hecho de que el material del que son fabricadas las fibras ópticas es vidrio. El vidrio, además de ser un material abundante y relativamente barato, permite que la propagación de la luz a través de la fibra óptica tenga pérdidas mínimas a frecuencias ópticas (alrededor de los 10^{14} Hz); el uso de frecuencias portadoras ópticas establece una posibilidad intrínseca de alcanzar anchos de banda de ese orden, lo cual resulta en comunicaciones fiables y de alta potenciabilidad de información. Otra ventaja del vidrio es que es un material dieléctrico, por lo que la fibra óptica resulta ser un canal de transmisión que es esencialmente inmune a interferencia electromagnética externa. En 1966 se produce un gran hito para lo que serían las futuras comunicaciones por fibra óptica, y es la publicación por Kao y Hockman de un artículo en el cual se señalaba que la atenuación observada hasta entonces en las fibras de vidrio no se debía a mecanismos intrínsecos sino a impurezas originadas en el proceso de fabricación. De esta manera las

fibras ópticas fueron propuestas como medios de transmisión de información a largas distancias. Otros usos de las fibras ópticas incluyen circuitería óptica, para el procesamiento y almacenaje de información, y aplicaciones en sensores.

Es interesante destacar que a inicio de los años 70 las primeras fibras ópticas con bajo índice de pérdidas fueron usadas no como medios de transmisión de información sino en el desarrollo de sensores. Desde entonces el área de sensores de fibra óptica ha continuado desarrollándose, ampliándose y madurando. Han sido desarrolladas varias técnicas de medición basadas en diferentes principios tales como la interferometría, métodos espectrales basados en las rejillas de Bragg grabadas en fibras, fluorescencia de fibras dopadas, esparcimiento de la luz en fibras, entre otros (Grattan y Meggit, 1995). Existen cientos de parámetros que se miden a través de estos sistemas, desde la temperatura y la presión atmosférica, hasta la composición del agua a grandes profundidades en mares y océanos.

II.2 Principios de transmisión de la luz en las fibras ópticas

Una fibra óptica es una hebra de materiales dieléctricos de baja absorción de la luz que permite atrapar la radiación óptica en un extremo y guiarla hasta el otro extremo. Normalmente, la fibra consiste en por lo menos dos materiales ópticos con diferentes índices de refracción. El material con índice de refracción más alto forma el núcleo de la fibra por donde viaja la mayor cantidad de radiación óptica. Otro material forma la cubierta que rodea por completo al núcleo. La luz es atrapada en la fibra óptica debido a la reflexión total interna que ocurre en la frontera entre el núcleo y la cubierta. En las fibras ópticas comerciales, la cubierta de la fibra también está rodeada por una o más capas hechas de plásticos que son agregadas principalmente para la protección

de la fibra y para aumentar su fortaleza mecánica, pero sin afectar directamente la propagación de la luz a través de la fibra.

Como se mencionó en el párrafo anterior, las fibras ópticas funcionan gracias al efecto de la reflexión total interna (figura 1). Los rayos de luz que inciden en la frontera núcleo-cubierta en ángulos mayores al del ángulo crítico, sufren de reflexión total interna y son guiados a través del núcleo sin ser refractados. El ángulo crítico se puede escribir como

$$\Theta_c = \text{sen}^{-1}(n_2/n_1) \quad (1)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y de la cubierta, respectivamente.

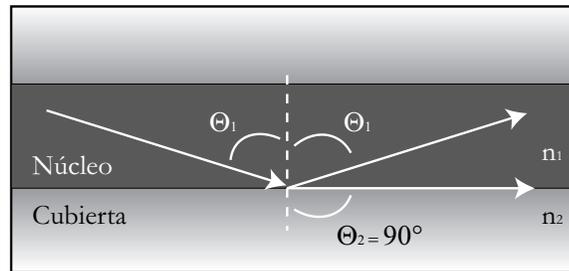


Figura 1: Efecto de reflexión total interna dentro de una fibra óptica.

Es conveniente describir la propagación de la luz en la fibra presentando la distribución de amplitud de la luz en la fibra como una superposición de modos. Un modo es un campo electro-magnético específico que viaja a lo largo de la fibra manteniendo su distribución transversal en amplitud. Cada modo tiene una constante de propagación que determina la rapidez del cambio en la fase, y su velocidad de grupo que determina la velocidad de propagación de los pulsos ópticos. Un análisis modal permite calcular fácilmente la distribución de la amplitud de la luz en la salida de la fibra cuando conocemos que composición de modos tenemos a la entrada de la fibra, sabiendo que el efecto de propagación a cada modo es únicamente el cambio de su fase

de acuerdo a la distancia y constante de propagación.

Un parámetro importante de una fibra es su apertura numérica, NA. El ángulo necesario para acoplar al núcleo un rayo luminoso desde el exterior recibe el nombre de ángulo de aceptación, Θ_α . Pues bien, el seno de este ángulo se denomina apertura numérica (ver figura 2), que podemos describir como

$$\Theta_\alpha = \text{sen}^{-1}NA \quad (2)$$

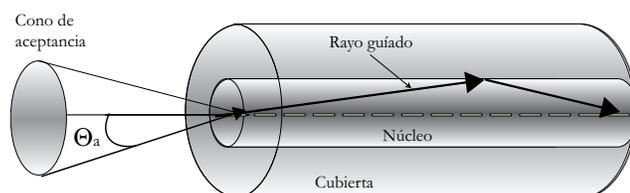


Figura 2: Ángulo de aceptación Θ_α de la fibra. Los rayos dentro del cono de aceptación son guiados por reflexión total interna.

II.3 Tipos de Fibras Ópticas

Una de las desventajas asociadas con la propagación de la luz en las fibras ópticas multimodo se debe a las diferencias entre las velocidades de grupo de cada modo (Saleh y Teich, 1991). Este efecto es llamado dispersión modal, el cual limita la velocidad a la que pulsos adyacentes pueden ser enviados sin traslaparse y por lo tanto, afecta la velocidad a la cual el sistema de comunicación óptica puede operar. Para la fibra monomodo ya no se presenta.

La dispersión modal en las fibras multimodo puede reducirse graduando el índice de refracción del núcleo de la fibra, de un valor máximo al centro a un valor mínimo en la frontera con la cubierta. Este tipo de fibra es llamada fibra de índice graduado,

mientras que las fibras convencionales con un índice de refracción constante en todo el núcleo son llamadas fibras de índice escalonado.

II.3.1 Fibras de índice escalonado.

Las fibras con índice escalonado tienen el diseño mas simple. Este perfil básico consiste en dos dieléctricos homogéneos concéntricos, como se muestra en la figura 3. El dieléctrico interior o núcleo, contempla la región $r < a$ y tiene un índice de refracción n_1 . El material exterior ($r > a$), llamado cubierta, tiene un índice de refracción n_2 , donde $n_2 < n_1$.

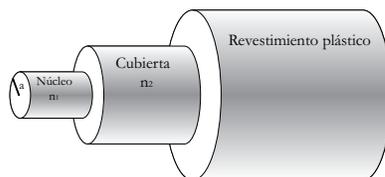


Figura 3: Fibra con índice escalonado.

Casi todas las fibras utilizadas en comunicaciones son fabricadas de cuarzo fundido de alta pureza química (SiO_2). Para provocar los pequeños cambios en el índice de refracción, se le agregan bajas concentraciones de materiales dopantes (por ejemplo titanio, germanio o boro). El índice de refracción n_1 está en el rango de 1.44 a 1.46, dependiendo de la concentración de dopante.

Entre las variables importantes tenemos el radio del núcleo a , y la diferencia relativa de índices del núcleo y la cubierta:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3)$$

Normalmente en las fibras ópticas el valor de n_1 es muy cercano al valor de n_2 , entonces $\Delta \ll 1$. Otro parámetro importante a considerar es la apertura numérica,

NA , definida como el seno del ángulo máximo de un rayo incidente que es totalmente confinado en la fibra. El ángulo máximo es alcanzado cuando el rayo que se propaga lo hace al mismo ángulo que el ángulo crítico, medido en la frontera núcleo-cubierta. Tomando en cuenta este hecho, la apertura numérica se expresa como

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4)$$

Las dimensiones de las fibras de índice escalonado, tanto monomodo como multimodo, han sido establecidas por varios comités, tales como el Electronic Industries Association (EIA), el International Electrotechnical Commission (IEC) y el Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique (CCITT). La cubierta tiene un diámetro de $125\mu m$, tal como es especificado en los estándares de producción de la mayoría de las fibras monomodo y multimodo. El diámetro del núcleo varía entre 50 y $100\mu m$ para las multimodo, y entre 4 y $10\mu m$ para las monomodo. Los valores típicos de Δ están alrededor de 0.2% para las monomodo y 1% para las multimodo (Buck, 1995).

II.3.2 Fibras de índice graduado.

El graduado en el índice de refracción de las fibras ópticas es un ingenioso método que reduce el ensanchamiento del pulso que se propaga en una fibra multimodo, causado por las diferencias en las velocidades de grupo de los modos. El núcleo de una fibra con índice de refracción graduado tiene un índice de refracción variable, mas alto en el centro y que se va decrementando gradualmente conforme de aleja del centro hacia la frontera con la cubierta. Por lo tanto, la velocidad de fase de la luz es mínima en el centro y se va incrementando conforme aumenta su distancia radial. Los rayos con un modo mas axial viajan la menor distancia a la menor velocidad de fase. Los rayos con modo mas oblicuo, zigzaguean con un ángulo mayor y viajan distancias mas largas, en

un medio donde la velocidad de fase es muy alta. De esta manera, las diferencias en distancias son compensadas con diferencias en velocidad de fase, y como consecuencia, las diferencias en las velocidades de grupo se reducen (Saleh y Teich, 1991).

El índice de refracción en el núcleo es una función $n(r)$ de la posición radial r y el índice de refracción de la cubierta es una constante, n_2 . El valor máximo de $n(r)$ es $n(0) = n_1$ y el valor mínimo es en el radio del núcleo $r = a$, $n(a) = n_2$ (figura 4). Podemos determinar el perfil de índices de refracción con la función

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^p \Delta \right], \quad r \leq a, \quad (5)$$

donde p , llamado el parámetro de perfil de graduación, determina la pendiente del índice de refracción. La función se evalúa desde n_1 en $r = 0$ a n_2 en $r = a$. Para $p = 1$, $n^2(r)$ es lineal, y para $p = 2$ es cuadrática. Cuando p tiende a infinito, $n^2(r)$ se aproxima a una función escalón. Entonces la fibra de índice escalonado es un caso especial de la fibra de índice graduado cuando $p \rightarrow \infty$.

II.4 Atenuación y dispersión en las fibras ópticas

La atenuación y dispersión representan dos de las principales características de las fibras ópticas. La atenuación limita la distancia a la cual puede ser transmitida la potencia óptica, mientras que la dispersión provoca el ensanchamiento temporal de los pulsos ópticos que llevan la información, lo que limita la velocidad de transmisión.

II.4.1 Atenuación

Las fuentes de atenuación en una fibra óptica se pueden dividir en intrínsecas y extrínsecas. Las pérdidas intrínsecas están asociadas con el esparcimiento de la luz

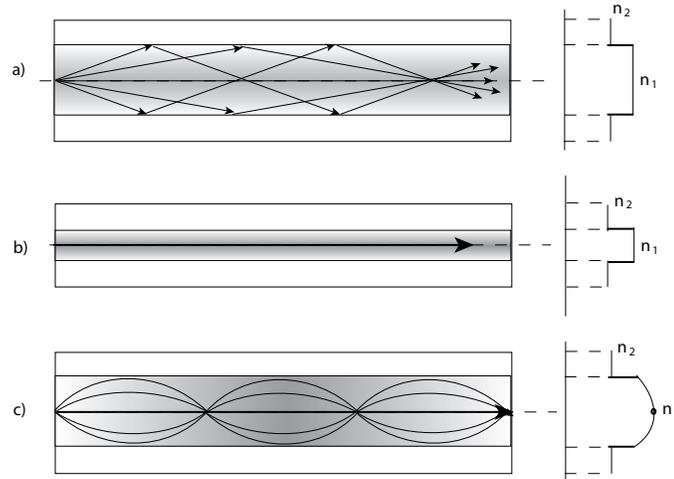


Figura 4: Geometría de perfiles de índice de refracción en: a) Fibra de índice escalonado multimodo, b) Fibra de índice escalonado monomodo, y c) Fibra de índice graduado multimodo (Saleh y Teich, 1991).

debido a las no uniformidades del índice de refracción del núcleo de la fibra y con la absorción de la luz por las impurezas del vidrio. En las fibras modernas la contribución principal en el esparcimiento es el llamado esparcimiento de Rayleigh, el cual no puede ser eliminado. Las pérdidas extrínsecas surgen de factores ajenos a la fibra tales como doblamiento o torsión, los cuales se introducen durante la fabricación del cable y su instalación.

La potencia de luz que viaja a través de una fibra óptica decrece exponencialmente con la distancia como resultado de la absorción y el esparcimiento. El coeficiente de atenuación α es definido en dB/km,

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \log_{10} \frac{1}{T} \quad (6)$$

donde $T = P(L)/P(0)$ es la razón de potencia de transmisión para una fibra de longitud L km. Una pérdida del 50% de la potencia de entrada equivale a -3dB.

Las pérdidas en dB son aditivas, mientras que la razón de transmisión es

multiplicativa. Entonces para una propagación a través de la fibra a una distancia de z kilómetros, la pérdida es αz dB.

II.4.2 Atenuación de la luz en vidrio

El coeficiente de atenuación del vidrio de silicio (SiO_2) depende de la longitud de onda, como se muestra en la figura 5. Este material tiene dos bandas predominantes de absorción: una banda de absorción en el infrarrojo y una banda de absorción en el ultravioleta.

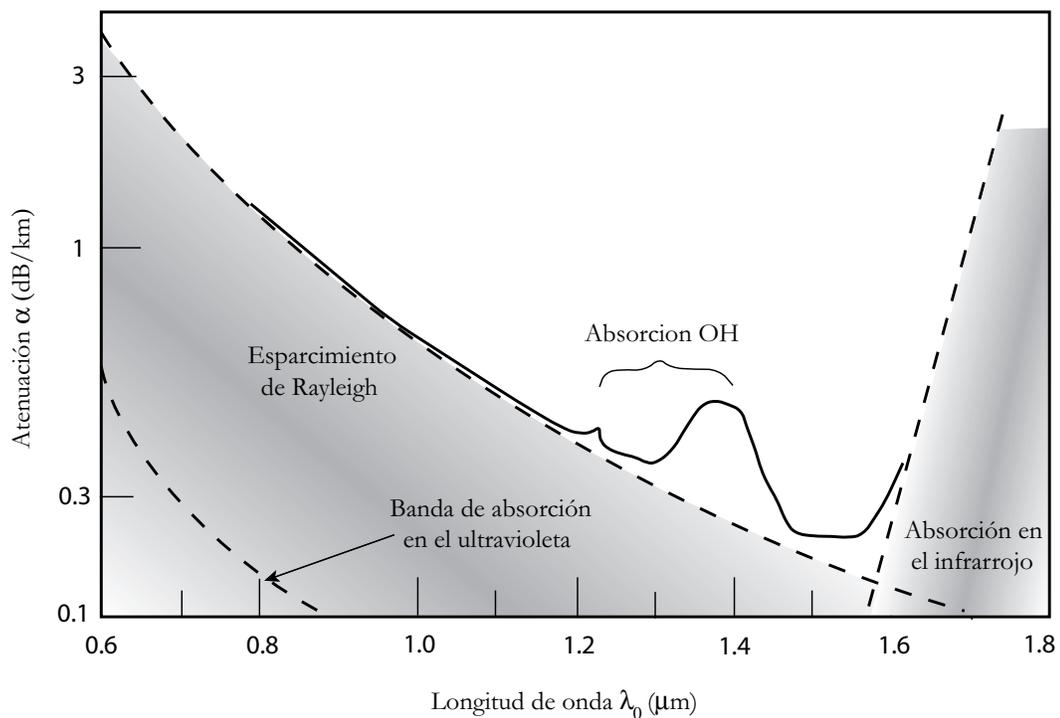


Figura 5: Dependencia del coeficiente de atenuación del silicio con la longitud de onda λ_0 . Hay un mínimo local en $1.3 \mu\text{m}$ ($\alpha \approx 0.3 \text{ dB/km}$) y un mínimo absoluto en $1.55 \mu\text{m}$ ($\alpha \approx 0.16 \text{ dB/km}$).

La fuente de los iones OH^- son las moléculas de agua que han sido atrapadas en el

vidrio, durante el proceso de fabricación. La absorción adicional puede ser causada por las moléculas de hierro, cobre y cromo, y de las moléculas de impurezas, principalmente iones de OH.

La absorción infrarroja es el resultado de la ionización y la excitación de la vibración de los átomos. Es decir, la energía de los fotones es absorbida por el material y convertida en energía térmica. La energía ultravioleta está asociada con la ionización de los átomos. La energía de los fotones ultravioletas es tan grande que puede ionizar los átomos que componen las moléculas del vidrio. En este caso, un fotón le pasa su energía al electrón que sale del átomo. La densidad de los electrones en el material es muy grande lo que resulta en un coeficiente de absorción muy alto, y la luz ultravioleta puede ser absorbida en una capa muy delgada del material, siempre y cuando la energía del fotón sea suficientemente alta.

Esparcimiento

El silicio puro es amorfo por naturaleza, por lo que se pueden presentar irregularidades en la estructura básica del material. Durante el proceso de fabricación de las fibras ópticas, el silicio sufre cambios drásticos de temperatura, pasando de un estado de fusión a un enfriamiento rápido, lo cual provoca que la densidad del material presente variaciones microscópicas aleatorias en su densidad. Debido a estos cambios en la densidad ocurren variaciones locales en el índice de refracción, las cuales actúan como centros esparsores. El efecto de estos centros esparsores en la luz que se propaga a través de la fibra es llamado esparcimiento de Rayleigh. El esparcimiento de Rayleigh es un efecto que contribuye a la atenuación de la luz. Cuando los rayos de luz que se están propagando por una fibra chocan contra una de estas no uniformidades del índice, se difractan. La difracción causa que la luz se disperse o se reparta en muchas direcciones. La amplitud del campo esparcido es proporcional a ω^2 . La intensidad esparcida es por

lo tanto proporcional a ω^4 o a $1/\lambda_0^4$, de manera que son más esparcidas las longitudes de onda cortas que las longitudes de onda largas. Entonces, la luz azul se esparce más que la luz roja (Saleh y Teich, 1991). Para la luz visible e infrarroja el esparcimiento de Rayleigh es más significativo que la cola de absorción en el ultravioleta, pero es insignificante en comparación con la absorción infrarroja cuando la longitud de onda es mayor a $1.6\mu m$. Como podemos ver en la figura 5 la ventana de alta transparencia del cuarzo fundido está limitada por el esparcimiento de Rayleigh para longitudes de onda cortas, y para longitudes de onda largas por absorción infrarroja.

II.4.3 Dispersión

Cuando un pulso de luz viaja a través de una fibra óptica su potencia se "dispersa" en el tiempo de manera que el pulso se extiende en un intervalo de tiempo más amplio, es decir, el pulso se ensancha. Existen cuatro fuentes de dispersión en las fibras ópticas: dispersión modal, dispersión material, dispersión de guía de onda y dispersión no lineal.

Dispersión Modal

La dispersión modal ocurre en las fibras ópticas multimodo como resultado de las diferencias entre las velocidades de grupo de los modos (Saleh y Teich, 1991). Un pulso incidente en una fibra con M modos en $z = 0$ se extiende en M pulsos con un retardamiento entre ellos incrementándose como función de z . Para una fibra óptica de longitud L , el retardamiento de los diferentes modos es $\tau_q = L/v_q$ con $q = 1, \dots, M$, donde v_q es la velocidad de grupo del modo q . Si v_{min} y v_{max} son la menor y mayor velocidad de grupo, el pulso a la salida de la fibra se extiende en un intervalo de tiempo $L/v_{min} - L/v_{max}$. Debido a que los modos no son excitados y atenuados de igual manera, la forma del pulso recibido tiene normalmente un perfil suave, como se ilustra en la figura 6.

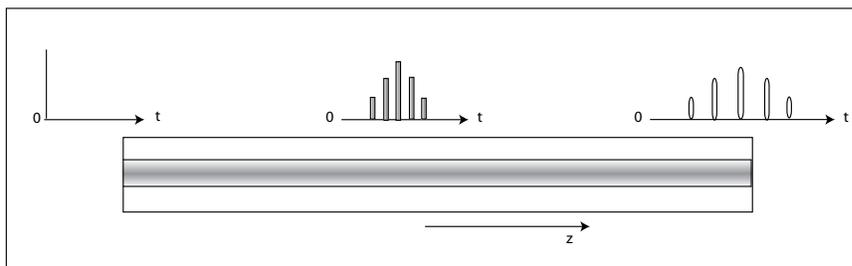


Figura 6: Ensanchamiento del pulso causado por la dispersión modal.

La dispersión modal es mucho menor en las fibras con índice graduado que en las fibras con índice escalonado, ya que en las fibras graduadas las velocidades de grupo son ecualizadas y se reduce la diferencia entre el retardamiento de los modos. Para ambos casos, el ensanchamiento del pulso causado por dispersión modal es proporcional a la longitud L de la fibra. Sin embargo esta dependencia no se mantiene necesariamente cuando las fibras son más largas que una cierta longitud crítica. Esto debido al acoplamiento entre modos que ocurre debido a pequeñas imperfecciones en la fibra, que provoca un intercambio de potencia entre los modos.

Dispersión cromática

Otro efecto conocido como dispersión cromática es producido por la dependencia que tiene la velocidad de grupo con la longitud de onda de la luz. En longitudes de onda donde la dispersión cromática es alta, los pulsos ópticos tienden a expandirse en el tiempo. La dispersión cromática de una fibra resulta de dos componentes: dispersión del material y dispersión de guía de onda. La dispersión del material es una característica inherente del material, que no puede ser fácilmente cambiada sin alterar la composición del vidrio y aumentar la atenuación. Sin embargo, es posible desplazar la dispersión modificando la dispersión de guía de onda. La dispersión de guía de onda se origina porque la propagación de la luz en una guía de onda depende de la longitud de onda.

Esto ocurre porque la distribución de la luz entre el núcleo y la cubierta cambia con la longitud de onda. El cambio de la distribución de la luz afecta la velocidad de transmisión de esta a través de la fibra. El núcleo y la cubierta tienen diferentes índices de refracción que determina la velocidad de la luz en ellos. Ya que la luz permanece un tiempo tanto en el núcleo como en la cubierta, su velocidad efectiva a través de toda la fibra es un promedio que depende de la distribución de la luz entre ambos. Un cambio en la longitud de onda cambiará la distribución de la luz, y así mismo la velocidad promedio, causando una dispersión de guía de onda (Portalgsm, 2005).

Afortunadamente la dispersión del material y de la guía puede tener diferentes símbolos, dependiendo si la velocidad de la luz en la fibra se incrementa o disminuye con la longitud de onda. De esta manera las dispersiones de guía de onda cancelan a la dispersión cromática en un punto cercano a 1.31mm en una fibra estándar del tipo índice escalonado tal como se muestra en la figura 7. Cambiando el diseño de la estructura de la fibra, de los perfiles y del índice de refracción del núcleo-cubierta se puede alterar la dispersión de guía de onda y así cancelar la dispersión cromática en otra longitud de onda.

Dispersión no lineal

A partir de cierto nivel de intensidad, el índice de refracción del medio empieza a variar en función de la intensidad. Por lo tanto las intensidades pequeñas no viajan a la misma velocidad que las grandes. Debido a que el pulso tiene una envolvente que presenta una variación continua de intensidad, el pulso de luz que se propaga en una fibra óptica sufre un ensanchamiento. Las partes de mayor intensidad del pulso óptico sufren retardos diferentes a las partes de menor intensidad y como consecuencia se altera la forma del pulso (Saleh y Teich, 1991). Bajo ciertas condiciones la dispersión no lineal puede compensar la dispersión material, de manera que el pulso se propague sin alterar su

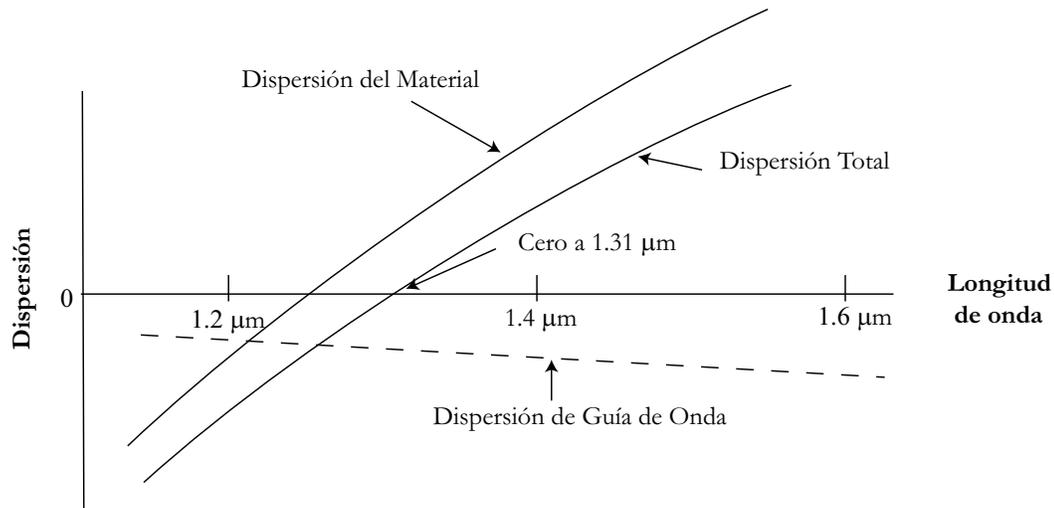


Figura 7: La dispersión de guía de onda compensa la dispersión cromática para producir un dispersión cero a $1.31 \mu\text{m}$ en una fibra monomodo del tipo escalonado.

perfil en el tiempo.

II.5 Birrefringencia

Aún las fibras monomodo tienen dos modos de polarización, porque pueden tener dos modos con polarizaciones ortogonales. Bajo condiciones ideales, cuando la fibra tiene una simetría cilíndrica perfecta y está libre de tensiones mecánicas, dos modos con polarizaciones ortogonales se propagan de manera independiente sin acoplarse, conservando sus amplitudes y con la misma velocidad. Sin embargo, las fibras reales tienen pequeñas variaciones en su diámetro y tensiones mecánicas que provocan pequeñas diferencias en sus constantes de propagación de los dos modos con polarizaciones ortogonales. Esta propiedad es llamada birrefringencia modal. El valor de la birrefringencia se define como

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y| \quad (7)$$

donde β_x , β_y , n_x y n_y son las constantes de propagación y los índices de refracción de los modos polarizados a lo largo del eje x y y , respectivamente. Cuando la luz en la fibra birrefringente tiene una polarización distinta de la polarización de los modos, la birrefringencia provoca una evolución periódica de la polarización. La longitud de la sección de la fibra que corresponde a un período de la evolución de la polarización se llama longitud de batimiento, que puede ser escrita como

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|} = \frac{\lambda}{B} \quad (8)$$

II.5.1 Efecto de birrefringencia en las fibras ópticas

Una fibra óptica ideal tiene una perfecta simetría circular (figura 8a), es recta, libre de tensión mecánica, y no está expuesta a campos magnéticos y eléctricos. Esta fibra hipotética no tiene birrefringencia. En esta fibra la luz con cualquier estado de polarización se propaga sin cambiarse. Cualquier par de polarizaciones ortogonales del modo fundamental LP_{01} tienen la misma velocidad de propagación (Burns, 1994). En una fibra real se presentan numerosas perturbaciones las cuales hacen que la fibra pierda su simetría (figura 8b). Considerando que la fibra y estas perturbaciones son homogéneas a lo largo de la fibra, el concepto de modos de propagación sigue aplicando, y en la fibra perturbada "monomodo" ahora existen dos modos de propagación LP_{01} diferentes. Estos tienen polarizaciones ortogonales y se propagan con una ligera diferencia en velocidades de fase. La fibra ideal se convierte en una fibra birrefringente.

La birrefringencia en una fibra óptica puede ser introducida ya sea mediante la elipticidad del núcleo que produce una birrefringencia geométrica, o por la aplicación de elementos de tensión localizados paralelamente a lo largo del núcleo, tensión elástica

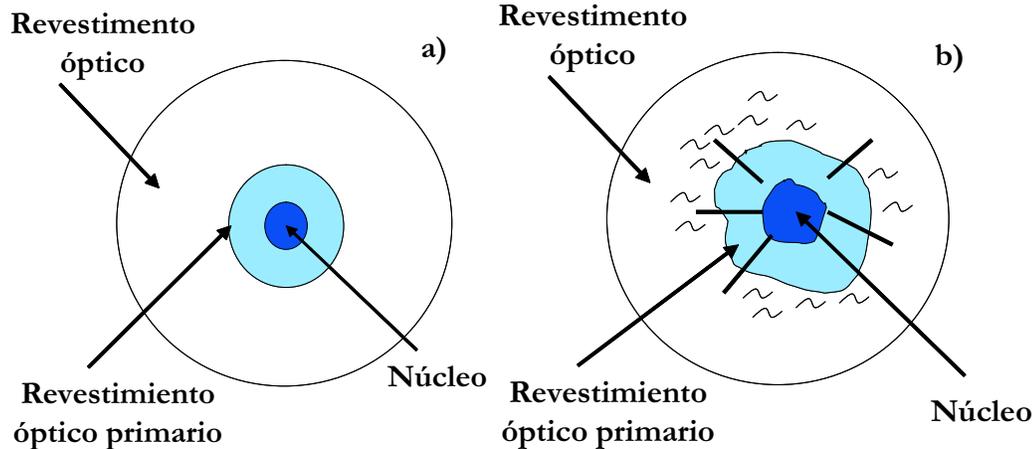


Figura 8: Corte transversal de una fibra óptica monomodo: a) Ideal, b) Real.

inducida durante el proceso de fabricación.

II.5.2 Birrefringencia Geométrica

Considerando una fibra cuyo núcleo es una sección transversal elíptica (eje mayor a lo largo del eje X y el eje menor a lo largo del eje Y) con índice de refracción constante n_1 rodeada por un revestimiento uniforme de índice n_2 tal que $n_2 = n_1 - \Delta n$ (figura 9). Los valores de los semiejes son a y b , respectivamente. La perturbación hecha a la sección circular del núcleo desaparece la degeneración de los modos linealmente polarizados LP_{01}^x y LP_{01}^y , alineados naturalmente a lo largo de los ejes de la sección elíptica.

Un segmento de fibra óptica con esta perturbación se comporta como si fuera una placa anisotrópica lineal cuyo eje lento está alineado con el eje mayor del núcleo con sección transversal elíptica. La longitud de batido depende de la razón a/b . Esta cantidad está relacionada con el valor de la frecuencia normalizada V . Generalmente, las fibras monomodo son usadas en la vecindad de la frecuencia de corte del primer modo, $V = 2.4$. En el caso de una elipticidad pequeña, tal como $a \approx b$ y en la vecindad

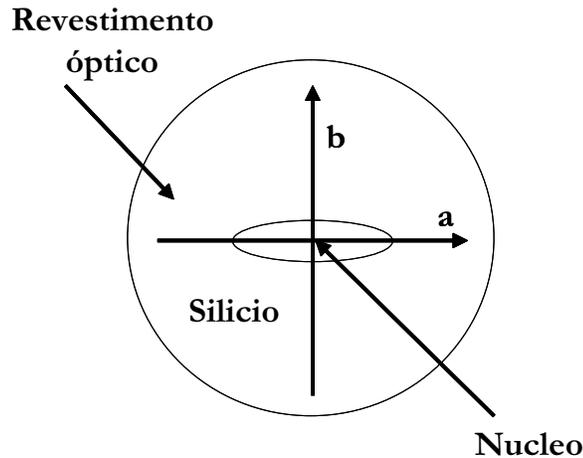


Figura 9: Fibra monomodo con núcleo elíptico.

de la frecuencia de corte, se obtiene que la birrefringencia depende del cuadrado de Δn y de la elipticidad del núcleo (Huard, 1997).

$$B = 0.2 \left(\frac{a}{b} - 1 \right) (\Delta n)^2 \quad (9)$$

donde Δn es la diferencia de índices entre el núcleo y el revestimiento.

Esta expresión muestra que si se quiere fabricar fibras monomodo de baja birrefringencia ($L_B \approx 100nm$) para una longitud de onda $\lambda = 1\mu m$ y una diferencia de índice de $\Delta n = 5 \times 10^{-3}$, el defecto relativo de la circularidad del núcleo $\left(\frac{a}{b} - 1 \right)$ tiene que ser mas pequeño que 0.2%, lo cual origina dificultades en el proceso de fabricación. También se puede fabricar fibras altamente birrefringentes. Para este tipo de fibras la longitud de batido es de algunos milímetros. Si la razón $a/b = 2$ y la longitud de batido es 3mm, entonces se tiene una diferencia de índice $B = 0.036$ para una longitud de onda de $1\mu m$. Debido a que la fibra debe mantener un modo, el diámetro máximo del núcleo es $2^a = 2.35\mu m$ lo que puede ser un inconveniente para muchas aplicaciones.

II.5.3 Birrefringencia inducida por tensión elástica

La idea principal del método de birrefringencia inducida por tensión elástica es la de usar, durante la construcción de la preforma, materiales que presenten diferentes coeficientes de expansión los cuales inducen tensión sobre el núcleo. Finalmente mediante el efecto fotoelástico, aparece una birrefringencia inducida (Kaminow y Ramaswamy, 1979).

En la figura 10 se muestra una fibra con un núcleo circular de índice de refracción n_1 rodeado por un revestimiento primario con una sección transversal elíptica cuyos semiejes son A y B . El núcleo y el revestimiento primario están a su vez rodeados por un revestimiento secundario, el cual no juega un papel importante en el guiado de la onda pero que tensiona la parte interna de la fibra. Durante el enfriamiento de la fibra, en el estiramiento, el revestimiento primario es tensionado en forma anisotrópica, debido a que el revestimiento primario y el medio externo presentan diferentes coeficientes de expansión.

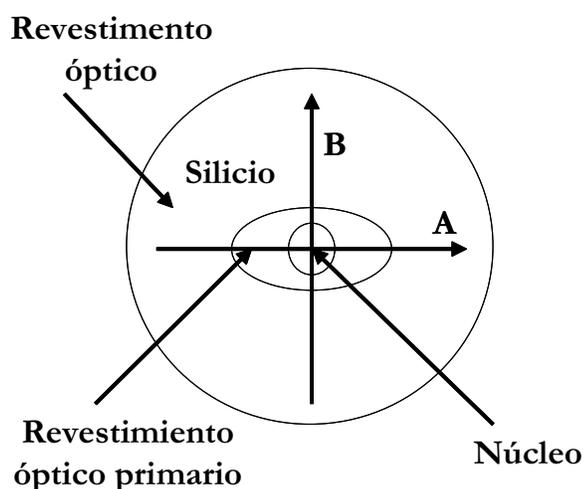


Figura 10: Fibra con revestimiento elíptico con birrefringencia inducida por tensión elástica.

La tensión asimétrica alrededor del núcleo circular de una fibra monomodo también se puede inducir mediante zonas en forma de corbata de moño y por zonas en forma de dos círculos, estas fibras son llamadas fibras tipo corbata de moño y fibras tipo PANDA, respectivamente (figura 11) (Poole y Payne, 1987).

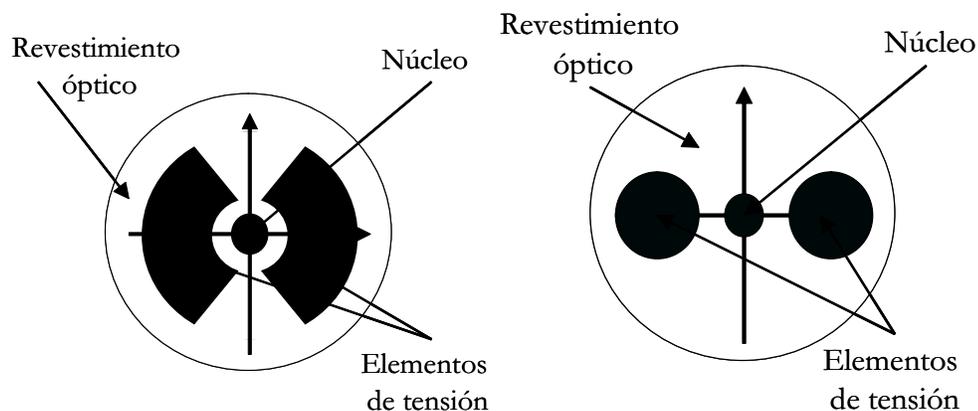


Figura 11: Sección transversal de fibras con tensión asimétrica.

Las zonas de tensión en la fibra están generalmente dopadas con boro, mientras que el núcleo está dopado con germanio, y el revestimiento se dopa con fósforo para disminuir el índice de refracción del silicio, el cual es el material base de las fibras.

Capítulo III

Sensores de Fibra Óptica

III.1 Introducción

En términos generales, un sensor es un dispositivo que detecta manifestaciones de fenómenos físicos y transforma la magnitud del fenómeno sensado en una magnitud diferente, de manera que se facilite su medición. Muchos de los sensores son eléctricos o electrónicos, aunque existen otros tipos. Pueden ser de indicación directa (por ejemplo, los termómetros de mercurio) o pueden estar conectados a un indicador, en el caso de los sensores electrónicos (posiblemente a través de un convertidor analógico a digital, una computadora y un display) de modo que los valores sensados puedan ser leídos por un humano. En el caso específico de esta tesis, el sensor recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica, la cual es compatible con los instrumentos electrónicos utilizados. El estímulo también es conocido con el término de *mesurando*, la cual es la característica cuantitativa del sensado (Fraden, 1996). La salida del sensor puede estar en la forma de voltaje, corriente o carga, la cual puede ser descrita en términos de amplitud, frecuencia o fase. Por otro lado están las fibras ópticas, las cuales son utilizadas para transmitir luz y, debido a sus características, sus aplicaciones son muy variadas, siendo empleadas principalmente en telecomunicaciones. Sin embargo, otro campo abarcado por las fibras ópticas es el de la metrología. Así, los instrumentos ópticos de medición han sido adaptados a la también creciente industria de la optoelectrónica, y con ello se ha producido una nueva clase de dispositivos ópticos de sensado: los sensores de fibra óptica. Entre las múltiples ventajas que tienen los

sensores de fibra óptica respecto a otros sensores en el mercado, está el hecho de que las fibras ópticas son fabricadas de material dieléctrico y el flujo de partículas usado para transmitir la señal está formado por fotones y no de electrones, por lo cual son inmunes a interferencia electromagnética, lo cual permite que los sensores de fibra óptica puedan ser ubicados cerca de grandes fuentes de interferencia electromagnética, tales como generadores de alta potencia, fuentes de poder de alto voltaje, etcétera. Otra propiedad muy útil de estos sensores es que pueden tomar una gran variedad de formas geométricas dependiendo de la aplicación del sensor, además de que pueden operar en condiciones ambientales severas. La idea básica de utilizar la fibra óptica como sensor es que podemos modular una o varias de las características de la luz en la fibra como consecuencia de la aplicación de un estímulo, y después demodular ópticamente la información por medio de métodos convencionales.

III.2 Estructura de un sensor de fibra óptica

Los sensores ópticos tienen una estructura muy sencilla (figura 12): consisten en una fuente de luz, un modulador de la luz y un fotodetector. Se utiliza una interfase óptica para acoplar la luz emitida de la fuente con el medio modulador. Los moduladores desempeñan una variedad de funciones, incluyendo la modulación de amplitud, fase, frecuencia y polarización. La mayoría de los moduladores son implementados como dispositivos de estado sólido en los cuales la luz es modulada mediante la variación de las propiedades ópticas del dispositivo a través de la aplicación de una señal de control eléctrica. La señal de control está relacionada con las propiedades del material por medio de un mecanismo electroóptico, acustoóptico o magnetoóptico (Tapia Mercado, 2001). Después de su paso por el modulador, la luz es guiada por una fibra a un demodulador óptico, el cual puede ser un acoplador direccional o un espectrómetro.

Finalmente, es necesario convertir la señal óptica en una señal eléctrica que pueda ser procesada, grabada o exhibida para su observación. Esto lo realiza el fotodetector o un arreglo de fotodetectores, los cuales convierten la energía óptica en energía eléctrica (Stolen y Paula, 1987).

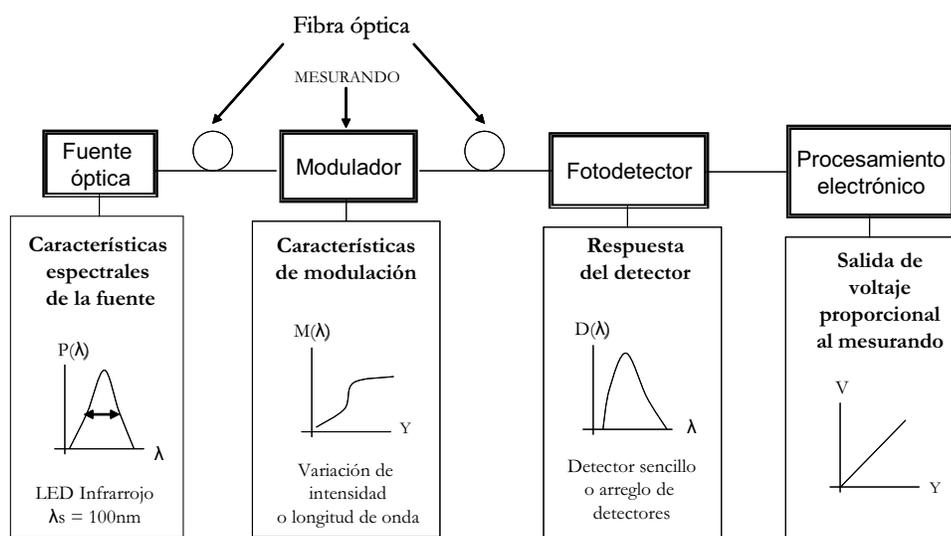


Figura 12: Esquema de un Sensor de Fibra Óptica

III.2.1 Fuentes de luz

Existe una amplia variedad de sensores disponibles, y con ello también existen una amplia variedad de fuentes que sirven para iluminar los sensores. La elección de la fuente de luz depende de varios factores, entre los principales están el modo de operación del sensor, la naturaleza de la señal a procesar, y el grado de precisión espacial y de medición requerido. Otros factores a considerar para la elección de una fuente de luz son su tamaño, las potencias de entrada y salida asociadas, el grado de estabilidad en la salida óptica, su tiempo de vida y el mantenimiento que necesita la fuente, la facilidad

de acoplar la luz proveniente de la fuente a la fibra, sus características espectrales, el ruido asociado y la coherencia (Grattan y Meggit, 1995).

Muchas de las fuentes utilizadas en los sensores de fibra óptica han sido adaptadas desde su uso como instrumentos analíticos de laboratorio. Las fuentes tienen dos funciones básicas: deben proveer la suficiente energía de radiación a la longitud de onda (o sobre ella) de interés, y deben mantener una intensidad constante en el intervalo de tiempo de uso del dispositivo. Podemos clasificar a las fuentes de luz como térmicas y luminiscentes. La diferencia recae en la técnica que utiliza cada tipo de fuente para producir luz. Las fuentes térmicas están basadas en la radiación que produce un cuerpo al ser calentado a través de la aplicación de una corriente eléctrica. Estos dispositivos son simples, por lo general son baratos, y pueden ser fácilmente reemplazados. Sus longitudes de onda abarcan un rango desde por encima de los $350nm$ hasta el infrarrojo. Un ejemplo típico de este tipo de fuentes es la lámpara de tungsteno.

En contraste, las fuentes luminiscentes son aquellas en las cuales se produce una descarga eléctrica, usualmente en un gas, resultando en la conversión de energía eléctrica en radiación. Un ejemplo de estas fuentes es el láser de gas.

Como se menciono anteriormente, la coherencia es una de las características a ser tomadas al momento de elegir la fuente de luz de un sensor. La coherencia de una fuente esta definida en términos de la relación entre lo fotones del haz de luz de que esta compuesto. Entonces, los láseres tienen una alta coherencia debido a que en el proceso de emisión estimulada, en el cual están basados los láseres, los fotones producidos están en fase unos con otros a un grado mucho mayor que los fotones producidos por una fuente de luz incoherente. Entonces, donde se requieren fuentes altamente coherentes se utilizan las fuentes de luz laser. Hay otras fuentes, de baja coherencia, como los diodos LED (Light Emitting Diode) cuyo espectro tiene un ancho considerable por lo cual no

se considera totalmente coherente.

III.2.2 Detectores

Un sensor óptico es un sistema en el cual un mesurando modula algún parámetro característico de una señal óptica, de una manera en que pueda ser reproducido y recuperado. Aunque el mecanismo de transducción es óptico, es necesario convertir la señal óptica en una señal eléctrica para poder procesar la señal, y que esta a su vez pueda ser grabada o exhibida. Esto se logra utilizando un fotodetector, el cual convierte la energía óptica en energía eléctrica. El fotodetector por sí solo produce una señal eléctrica débil, la cual es amplificada para poder ser procesada. A la combinación de un fotodetector con un amplificador se le llama receptor.

Existen dos clases de fotodetectores: los detectores térmicos y los detectores fotónicos. En un detector térmico, la energía óptica incidente es convertida en calor dentro del detector, provocando que una señal eléctrica sea modulada por un aumento de temperatura. En estos detectores la energía de un solo fotón no tiene relevancia alguna; es importante únicamente la energía óptica total, de manera que la respuesta del detector es independiente de la longitud de onda. En un detector fotónico, una portadora cargada eléctricamente es liberada debido a la absorción de la energía de un fotón. Un ejemplo de detector fotónico es el fotodiodo. Los fotodiodos son diodos de unión P-N cuyas características eléctricas dependen de la cantidad de luz que incide sobre la unión.

III.3 Tipos de sensores de fibra óptica

En el caso de los sensores de fibra óptica, la fibra óptica puede actuar como medio modulador o como un simple conductor de la misma hacia otro medio modulador.

De esta manera podemos clasificar a los sensores de fibra óptica como intrínsecos o extrínsecos. Los sensores intrínsecos o sensores completamente de fibra óptica son aquellos en los cuales el mesurando actúa directamente en la fibra óptica modulando alguna propiedad física de la misma. Los sensores extrínsecos o híbridos de fibra óptica son aquellos donde la fibra actúa solo como un conducto para transmitir luz hacia un dispositivo modulador de la luz. Cada uno de estos tipos de sensores presenta sus ventajas y desventajas. Los sensores extrínsecos presentan problemas de conexión con la entrada y salida del modulador de luz, a diferencia de los sensores intrínsecos, ya que el hecho de ser totalmente de fibra óptica reduce los problemas de conexión o alineación. Otras ventajas de los sensores intrínsecos es que son más versátiles en su instalación así como más compactos. Los sensores de fibra óptica también pueden ser divididos por los mecanismos de modulación, y pueden ser clasificados en medición de intensidad o interferométricos. Los sensores de intensidad suelen ser basados en fibra multimodo, mientras que los interferométricos utilizan principalmente fibra monomodo.

III.4 Sensores Interferométricos

Los sensores interferométricos ofrecen una alta sensibilidad en el sentido. La mayoría de estos sensores utilizan fibra monomodo, debido a que esta facilita la construcción de interferómetros con la propia fibra, permitiendo la medición de pequeños cambios de fase en la luz transmitida a través de la región sujeta al estímulo. Esto se logra haciendo una comparación entre la fase de una onda de luz que no ha sido sujeta a ninguna perturbación y la fase de una onda de luz que ha atravesado la trayectoria sensada, ambas provenientes de la misma fuente. Esta diferencia de fase puede medirse con una sensibilidad de 10^{-6} parte de una longitud de onda (Jackson, 1985). Debido a que en los sensores interferométricos no existe espacio libre entre el camino óptico

de la fuente y los detectores, se eliminan los problemas de alineación que son tan comunes si se usa un interferómetro óptico convencional. En los sensores de fibra óptica, cualquier cosa que cambie las propiedades ópticas de la fibra producirá un cambio en la señal. Las fibras monomodo convencionales utilizadas en los sensores interferométricos no mantienen el estado de polarización de la luz, lo cual provoca cambios severos en la polarización de la señal al propagarse a lo largo de la fibra. En el peor de los casos, esto puede provocar que las ondas de sensado y de referencia lleguen a tener polarizaciones ortogonales, de forma que su combinación provoque un desvanecimiento completo de la señal del interferómetro. Para evitar estos problemas, al utilizar fibras monomodo convencionales se deben agregar controladores de polarización al arreglo del interferómetro lo cual reduce los problemas de polarización. La implementación de los diversos arreglos interferométricos con fibra óptica se han derivado de los diseños de los interferómetros convencionales clásicos, entre los cuales están el Fabry-Perot, Michaelson, Mach-Zender y Sagnac (figura 13). Los sensores interferométricos pueden subdividirse de acuerdo al número de fibras que utilizan como interferómetro de una sola fibra e interferómetro de dos fibras.

Algunos tipos de sensores interferométricos más importantes con aplicaciones masivas de fibra óptica son el sensor de rotación o giroscopio, el cual se basa en el principio de Sagnac; el sensor de campo magnético, sensor de temperatura, sensor de desplazamiento y acelerómetros.

III.5 El interferómetro de Sagnac y sus aplicaciones

El sensor de rotación está basado en el efecto Sagnac, el cual establece que la luz que se propaga en direcciones opuestas alrededor de una trayectoria en forma de lazo cerrado experimenta una diferencia de camino óptico ΔL cuando este lazo es rotado alrededor

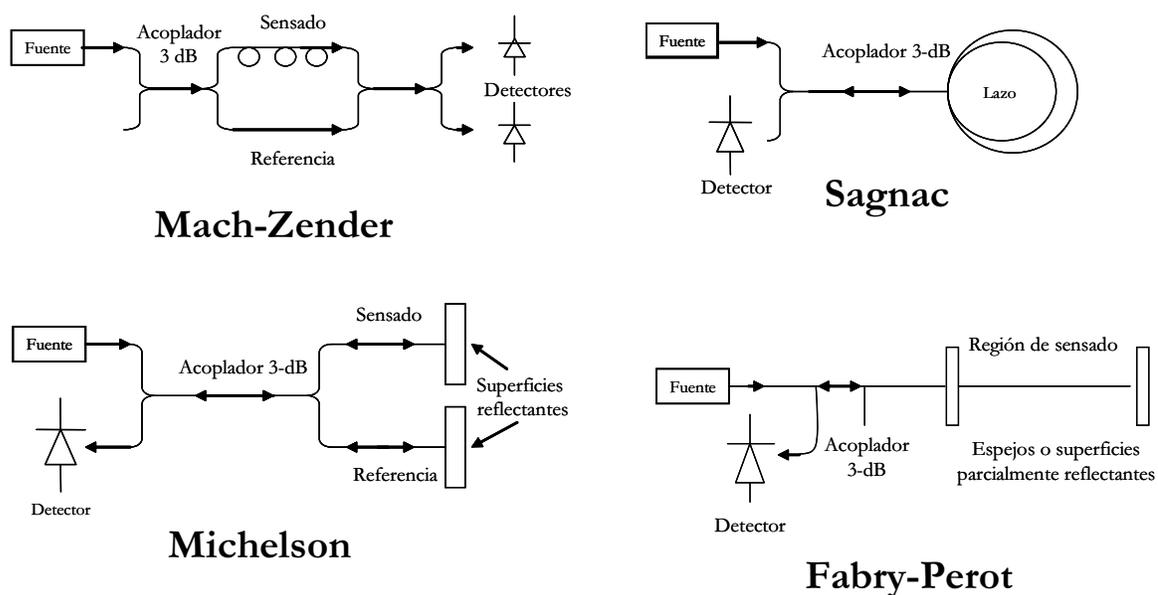


Figura 13: Arreglos interferométricos de sensores de fibra óptica

de su eje normal. En la figura 14 se puede apreciar la estructura de un interferómetro de Sagnac. Un haz de luz proveniente de una fuente láser es dividido en dos haces por medio de un acoplador direccional. Ambos haces recorren una trayectoria en direcciones opuestas, y a la salida del interferómetro se observa un patrón de franjas de interferencia.

Además del sensor de rotación, el interferómetro de Sagnac puede ser utilizado como sensor de una gran variedad de fenómenos ambientales. La sensibilidad que puede presentar el interferómetro de Sagnac de fibra óptica hacia campos eléctricos, magnéticos, así como a presión aceleración y temperatura convierte a este instrumentos en un elemento sensor ideal para diversas aplicaciones, y se encuentra entre los interferómetros de fibra óptica con mayor potencial para las aplicaciones como sensor de temperatura, debido a su alta sensibilidad a cambios de temperatura cuando se usa un lazo de fibra birrefringente (Tapia Mercado, 2001).

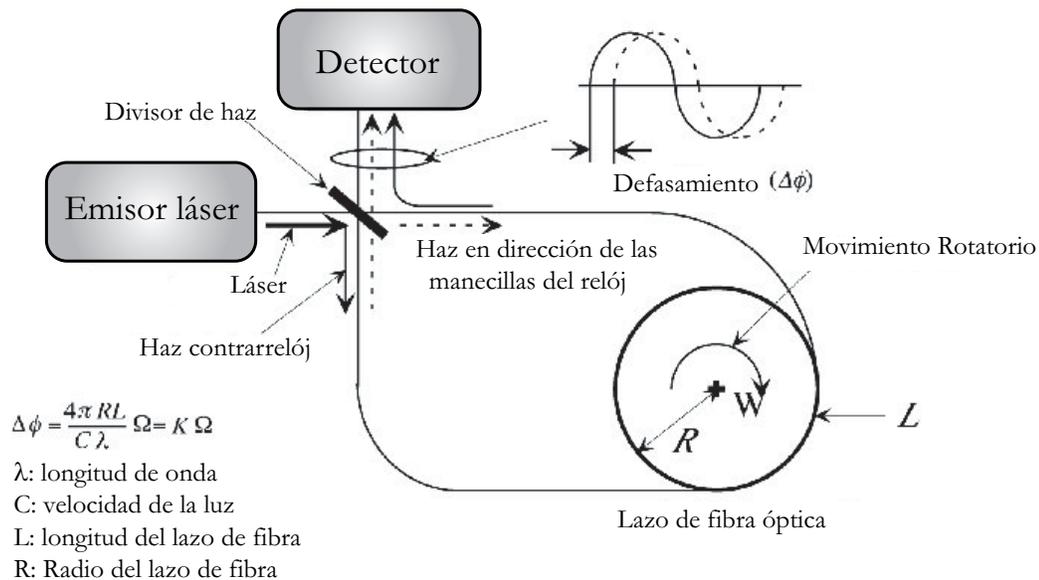


Figura 14: Interferómetro de Sagnac de fibra óptica como sensor de rotación

III.6 Interferometría de Baja coherencia

Para obtener todas las ventajas de la potencial sensibilidad de los sensores de fibra óptica se requieren fuentes altamente coherentes muy estables con bajo ruido de fase. Cuando se usa este tipo de fuentes por lo general no se puede lograr la calibración absoluta de la diferencia de fase y surge un límite en el alcance debido a la naturaleza periódica de la señal de salida del interferómetro. Estos problemas se pueden evitar mediante el uso de fuentes que emitan en un rango amplio de longitudes de onda, manteniendo el compromiso final de la alta sensibilidad deseada en el sensor. Esta técnica es conocida como interferometría de baja coherencia o interferometría de luz blanca. Una característica primordial de los sensores basados en la interferometría de baja coherencia es que la exactitud de la medición es insensible a las fluctuaciones de

potencia óptica que ocurren a lo largo de la fibra usada para conectar el sensor remoto y la unidad procesadora de la señal (Rao y Jackson, 1996). En un esquema general, el sensor interferométrico de baja coherencia tiene como fuente luz no monocromática, la cual es transmitida al sensor interferométrico a través de un acoplador direccional de fibra óptica, como lo muestra la figura 15. Las fuentes usadas en esta técnica son principalmente LEDs cuya distribución espectral en intensidad es cercana a una Gaussiana:

$$I(k) = I_0 \exp \left[-4 \left(\frac{k - k_0}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (10)$$

donde k_0 es el número de onda central, $\frac{\sigma}{2}$ es el ancho medio del espectro en el cual la intensidad de la fuente decae a $\frac{1}{e}$ de su valor máximo en I_0 , k_0 es vector de onda central del espectro del LED.

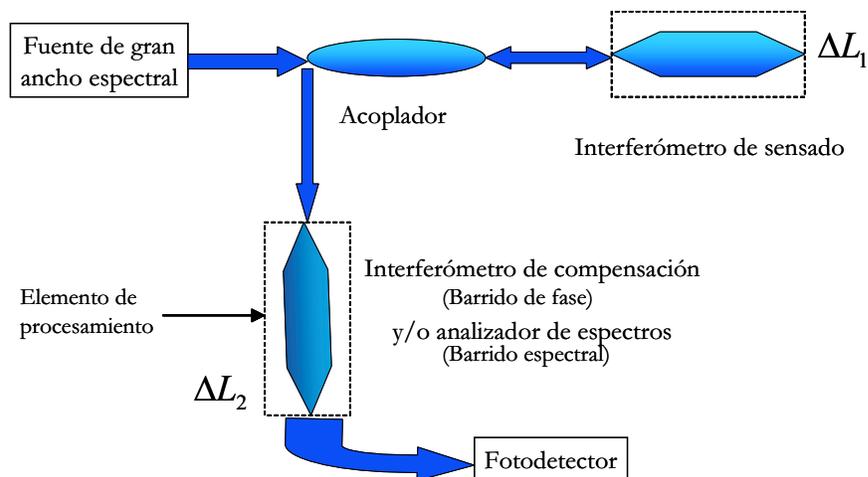


Figura 15: Arreglo de un interferómetro de baja coherencia

El principio por el cual podemos hacer mediciones con un sensor interferométrico es la generación de una diferencia de camino óptico entre los dos brazos del interferómetro. La amplitud incidente en el sensor interferométrico es dividida en los dos brazos del interferómetro, y en uno de estos brazos la acción del mesurando provoca una diferencia del camino óptico entre la luz que viaja en este brazo y la luz que viaja en el otro brazo del interferómetro que no está sujeto a ningún mesurando. El sensor se diseña de tal forma que exista una relación definida entre la diferencia de camino óptico y el mesurando. La intensidad de la luz en la salida del interferómetro de sensado de dos haces depende de la diferencia de camino óptico.

En general, la amplitud del campo eléctrico E de la luz de entrada al interferómetro se expresa como

$$E(k, \varphi) = A(k, \varphi) \exp[-i\varphi] \quad (11)$$

donde φ es la fase y $A(k, \varphi)$ es la amplitud de la onda. En el caso de un interferómetro de dos haces, como el Mach-Zender, con una diferencia de camino óptico de ΔL , la amplitud del campo eléctrico es dividida en dos brazos $E_1(k, \varphi)$ y $E_2(k, \varphi + k \cdot \Delta L)$. Al ser recombinados, estos haces interfieren dando una señal de salida cuya intensidad puede ser expresada como

$$I(k) = (E_1(k, \varphi) + E_2(k, \varphi + k \cdot \Delta L)) \cdot (E_1(k, \varphi) + E_2(k, \varphi + k \cdot \Delta L))^* \quad (12)$$

donde (*) especifica la conjugación compleja. La función de transferencia del interferómetro de dos haces es inherentemente no lineal, que nos da en la salida del interferómetro la intensidad

$$I(k) = I_0 [1 + m(k, \Delta L) \cos(k \cdot \Delta L)] \quad (13)$$

donde $m(k, \Delta L)$ representa la visibilidad de las franjas y $k \cdot \Delta L$ es la diferencia de fase, asociado con el mesurando.

La intensidad a la salida del interferómetro de sensado, ecuación 13, consiste en una función coseno multiplicada por una envolvente $m(k, \Delta L)$. La forma y ancho de esta envolvente depende de las características de la fuente y frecuentemente se define en términos de la longitud de coherencia de la fuente, L_c . La longitud de coherencia de la fuente es aquella diferencia en caminos ópticos sobre la cual un interferómetro debe ser desplazado respecto a su posición de balance, tal que la intensidad de las franjas de interferencia decaiga a $\frac{1}{e}$ de su valor en la posición de balance y esta dada por (Born y Wolf, 1980)

$$L_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (14)$$

donde $\Delta\lambda$ es el ancho espectral y λ_0 es la longitud de onda central de la fuente.

Si el estímulo se representa como un cambio de temperatura, este provocará un cambio en las propiedades ópticas de la fibra dando como resultado un cambio en el camino óptico de la luz (modulación de fase). Esto se visualiza como un desplazamiento de las franjas de interferencia, permitiendo la medición del estímulo (Hocker, 1979).

La señal de salida del interferómetro de sensado, es acoplada a través de una fibra conectora a un interferómetro de compensación o a un analizador de espectros. El elemento final del sistema es un fotodetector y este genera una señal eléctrica de la cual se derivan la diferencia de camino óptico y el mesurando.

Existen dos esquemas básicos de procesamiento para la interferometría de baja coherencia o de luz blanca, basados según el arreglo del sensor, ya sea para una configuración interferómetro/espectrómetro que utiliza el procesamiento en el dominio espectral, o bien para una configuración interferómetro/interferómetro llamado procesamiento

en el dominio de la fase.

III.6.1 Procesamiento en el dominio de fase

Esta implementación particular de la interferometría de baja coherencia consiste en un arreglo interferómetro/interferómetro. Este arreglo fue propuesto por Ulrich (Ulrich y Johnson, 1979), donde un interferómetro, llamado interferómetro de compensación, es colocado entre el interferómetro sensor y el detector. El interferómetro de compensación es el encargado del procesamiento y debe ser un interferómetro no balanceado, por ejemplo, se puede usar interferómetros Michelson, Fabry-Perot y Mach-Zender. El interferómetro no balanceado es colocado en un ambiente controlado, alejado del área de medición, mientras que el interferómetro de sensado esta localizado dentro del área de medición.

Las franjas de interferencia no pueden ser observadas con el interferómetro de medición ni con el de compensación cuando estos son utilizados de manera individual, debido a que las diferencias de camino óptico de cada interferómetro son por lo general mas grandes que la longitud de coherencia de la fuente L_c . La función del interferómetro de compensación (o interferómetro de procesamiento) es la de reestablecer el efecto de interferencia devolviendo la coherencia temporal a las ondas de luz que regresan del interferómetro sensor. Es posible que ocurra interferencia a la salida del interferómetro de procesamiento, siempre y cuando la diferencia de camino óptico de este interferómetro sea ajustada para igualar la diferencia de camino óptico del interferómetro de sensado con la longitud de coherencia de la fuente. La intensidad a la salida del arreglo esta dada por

$$I(k, \Delta L_1, \Delta L_2) = I_0 [1 + m (\Delta L_1 - \Delta L_2) \cos (k (\Delta L_1 - \Delta L_2))] \quad (15)$$

donde $m(\Delta L_1 - \Delta L_2)$ representa la visibilidad de las franjas. La fase y la visibilidad de las franjas de la señal interferométrica resultante son función de la diferencia de camino óptico de los dos interferómetros.

III.6.2 Procesamiento en el dominio espectral

En la técnica basada en el procesamiento en el dominio espectral el elemento de procesado óptico es un espectrómetro o analizador de espectros, el cual es un aparato usado para medir la distribución espectral de la potencia de la luz. El espectrógrafo está unido por medio de una fibra conectora a la salida sensor interferométrico, y nos permite obtener el espectro de potencia de la radiación $I(k)$, con una cierta resolución espectral. Para obtener el espectro de la luz en forma de una señal eléctrica se utiliza un fotodetector multicanal.

Si la fuente de un gran ancho espectral es un LED con distribución espectral Gaussiana, el espectro a la salida del interferómetro estará dado por

$$I(k) = I_0 \exp \left[-4 \left(\frac{k - k_0}{\sigma} \right)^2 \right] [1 + \cos(k \cdot \Delta L)] \quad (16)$$

donde $k \cdot \Delta L$ es la diferencia de fase. En la figura 16 se muestra el resultado de la función, la cual es un producto de las franjas periódicas del coseno y el espectro de potencia Gaussiano de la fuente.

El número total y la periodicidad de las franjas cosenoidales producidas dependen de la diferencia de camino óptico en el interferómetro y de la longitud de onda de la fuente. Los máximos de estas franjas ocurren cuando:

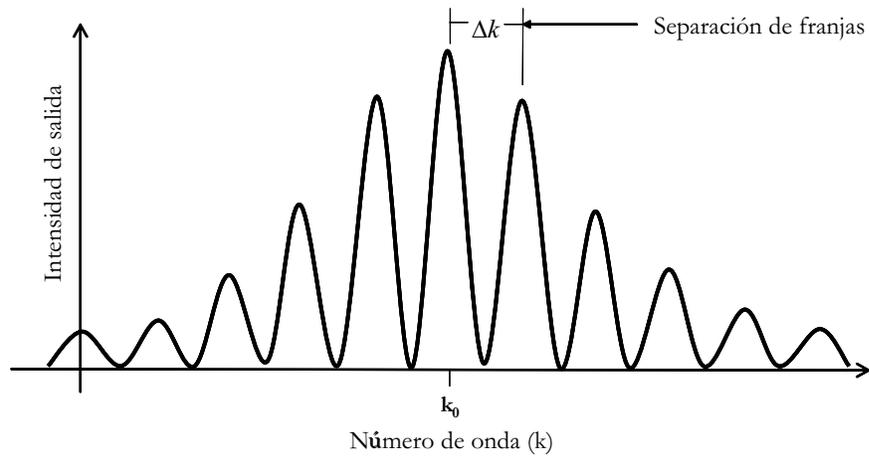


Figura 16: Espectro de potencia producido a la salida del interferómetro.

$$k \cdot \Delta L = 2\pi q \quad (17)$$

donde q es el orden de interferencia.

La separación entre franjas adyacentes o período de modulación de la señal de salida del interferómetro de sensado, en el espacio de longitud de onda, esta dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta L} \quad (18)$$

Esta relación nos indica que las franjas empiezan a compactarse cada vez mas conforme se incrementa el valor de desbalance del interferómetro. De la teoría de muestreo se tiene que el valor mínimo posible de la separación de las franjas esta dado por:

$$\Lambda_{\min} = 2R_0 \quad (19)$$

donde R_0 es la resolución del espectrómetro.

Por consiguiente, el máximo cambio de fase espectral $\Delta\varphi_{\max}$ que se da es

$$\Delta\varphi_{\max} = 2\pi \cdot \Delta q_{\max} \quad (20)$$

Con lo cual se obtiene que

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{\pi\lambda}{R_0} \quad (21)$$

donde Δq_{\max} es el número máximo de franjas espectrales detectables.

Existe solamente una franja espectral dentro de la envolvente de la fuente $\Delta\lambda$ si

$$\Lambda = \Delta\lambda \quad (22)$$

La máxima diferencia en la longitud de camino óptico ΔL_{\max} que puede tener el interferómetro de sensado depende de la resolución R_0 del espectrómetro. Esta longitud máxima representa la longitud de coherencia para la técnica del dominio espectral:

$$\Delta L_{\max} = \frac{\lambda^2}{2R_0} \quad (23)$$

El desempeño del sensor dependerá de las propiedades del espectrógrafo y en particular de la resolución R_0 . Esta última limita el rango de operación debido a que la frecuencia de la modulación espectral se incrementa con la diferencia de camino óptico y la sensibilidad depende del cambio mas pequeño que pueda ser detectado.

III.7 Sensores con fibras altamente birrefringentes

Las fibras altamente birrefringentes son frecuentemente usadas como el elemento activo en los sensores interferométricos de fibra óptica (Mantynkien y Urbanczyk, 2000). El motivo es que las fibras altamente birrefringentes superan las dificultades que presentan las fibras ópticas monomodo ordinarias, las cuales generan variaciones en el estado de polarización de la luz guiada, a causa de perturbaciones externas tales como curvaturas o tensiones en la fibra, y por el contrario, las fibras altamente birrefringentes dejan el estado de polarización inmune a la mayoría de las perturbaciones, mediante la introducción deliberada de niveles de birrefringencia intrínseca en exceso, comparadas con aquellas producidas por factores externos. Es decir, la luz que es introducida a la fibra con polarización lineal paralela a uno de los ejes de la birrefringencia permanecerá polarizada paralela a este eje, aún y cuando la fibra sea curvada (ligeramente), torcida, apretada o expuesta a campos magnéticos o eléctricos. Estas fibras altamente birrefringentes son llamadas fibras que preservan polarización. Tales fibras son caracterizadas por su birrefringencia modal B (ecuación 7) (Kaminow y Ramaswamy, 1979).

La magnitud de la birrefringencia interna está caracterizada generalmente por la longitud de batido L_B de los dos modos de polarización (ecuación 8).

La longitud de batido representa la longitud de la fibra para la cual la diferencia de fase entre los dos modos de polarización es igual a 2π , es decir, es la longitud de propagación en la fibra en la cual cualquier estado de polarización vuelve a repetirse.

La birrefringencia de una fibra monomodo puede ser introducida ya sea mediante la elipticidad del núcleo, birrefringencia geométrica, o por la aplicación de elementos de tensión localizados paralelamente a lo largo del núcleo, tensión elástica inducida

durante el proceso de fabricación (Noda y Sasaki, 1986).

III.8 Características de un sensor

Es necesario establecer la manera en que un sistema de medición debe ser juzgado y como es que los distintos elementos del sistema interactúan de manera que afecte el desempeño del sistema en general. El criterio de desempeño para sistemas de medición es identificado por las características que relacionan a la salida del sistema de medición con el valor real medido. Estos son la sensibilidad, la relación señal a ruido (SNR), la resolución, el rango dinámico, precisión, repetibilidad, estabilidad y tiempo de respuesta.

a) Sensibilidad: La sensibilidad s es el cambio en la respuesta de un instrumento de medición dividido por el correspondiente cambio del estímulo, esto es

$$s = \frac{dx}{dy}$$

b) Razón señal a ruido (SNR): Es la razón entre la señal máxima y el ruido asociado con la señal.

c) Resolución: Como el ruido rige los cambios mas pequeños que pueden ser distinguidos en una variable física de interés, entonces la resolución R de un instrumento es el valor de la variable sujeta a medición que produce una señal de salida igual al ruido.

d) Rango dinámico: Representa el conjunto de valores del mesurando o la longitud de la escala obtenida de la razón de la escala total y el ruido.

e) Precisión: La precisión de un instrumento de medición es la aptitud para dar respuestas próximas al valor verdadero.

f) Repetibilidad: Aptitud de un instrumento de medición para proporcionar indicaciones próximas entre si por aplicaciones repetidas del mismo mesurando bajo las mismas condiciones de medición. Estas condiciones incluyen:

- Reducción a un mínimo de las variaciones debidas al observador.
- El mismo procedimiento de medición.
- El mismo observador.
- El mismo equipo de medición, utilizado bajo las mismas condiciones.
- El mismo lugar.
- Repetición en un periodo corto de tiempo.

g) Estabilidad: Aptitud de un instrumento de medición para mantener constante en el tiempo sus características metrológicas.

h) Tiempo de respuesta: Intervalo de tiempo que comprende el instante en el cual una señal de entrada es sometida a un cambio brusco especificado y el instante en el cual la señal de salida alcanza dentro de los limites especificados un valor en régimen estable y sostenido.

Capítulo IV

Sensor de temperatura elaborado con un lazo de Sagnac

IV.1 Introducción

Como ya se mencionó en el capítulo II, las características de los sensores interferométricos de fibra óptica los hacen óptimos para la medición de una gran variedad de variables físicas que presentan una variación lenta. Sobre este tema se han realizado una gran cantidad de investigaciones, y en el caso de la presente tesis, se tomó como referencia la investigación realizada como tesis de doctorado por Juan Tapia Mercado sobre sensores de fibra óptica basados en la interferometría de baja coherencia (Tapia Mercado, 2001). El presente trabajo utiliza varios resultados teóricos del trabajo anterior, pero fue desarrollado para otro tipo de sensor: un sensor dual y sus aplicaciones para medición de humedad. Además fue desarrollada una metodología de simulación numérica de un sensor basado en el interferómetro de Sagnac que permite obtener los resultados teóricos para un sensor simple así como para un sensor dual. Por medio de programas realizados en Matlab, fue posible simular el comportamiento del campo al propagarse en el interferómetro. Entre las principales ventajas de usar simulación numérica está la gran cantidad de datos que es posible obtener a una velocidad mucho mayor que la que permiten los estudios experimentales, así como la facilidad con que se pueden manipular los distintos parámetros que intervienen en la perturbación de la luz que se propaga en una fibra óptica birrefringente. Gracias a esta manipulación es posible optimizar el arreglo experimental, sin la necesidad de hacer numerosas pruebas que representen

pérdida de material de laboratorio y pérdida de tiempo. A lo largo del capítulo se mostrará, por medio de gráficas, el procedimiento que se utilizó para procesar una señal de salida del sensor interferométrico, así como una comparación de resultados obtenidos del procesamiento de señales simuladas con los resultados obtenidos por métodos experimentales, con el fin de comprobar la efectividad del programa de simulación.

IV.2 Sensor de temperatura compuesto por un lazo de Sagnac

Además de ser usando como sensor de rotación, el interferómetro de Sagnac puede ser configurado para hacer mediciones de otros fenómenos. Esto puede lograrse usando diseños que tienen sensibilidad dependiente e independiente de la frecuencia, una sensibilidad escalable, y otras propiedades interesantes que son únicas de este interferómetro. En este capítulo, se describe el diseño del interferómetro de Sagnac con lazo de fibra altamente birrefringente torcida para mediciones de temperatura.

IV.2.1 Principios del funcionamiento del interferómetro de Sagnac

La estructura de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica está formada por un acoplador direccional de fibra óptica con cuatro puertos, de los cuales dos, los puertos de salida P_3 y P_4 , son unidos mediante fibra altamente birrefringente para formar una trayectoria cerrada (figura 17). La fibra está torcida $\pi/2$ con el fin de permitir que el interferómetro sea insensible a la polarización de la luz de entrada (Fang, 1995). Cuando se hace incidir un haz de luz a través del puerto de entrada P_1 del acoplador, el haz se divide en dos haces complementarios, que emergen del acoplador por los puertos P_3 y P_4 , respectivamente. Los haces recorren el lazo de fibra altamente birrefringente, una misma trayectoria pero en direcciones opuestas. Al terminar el recorrido los haces

entran nuevamente por los puertos P_3 y P_4 del acoplador, donde harán interferencia, dando lugar a dos señales complementarias que pueden ser observadas en la salida de los puertos P_1 y P_2 .

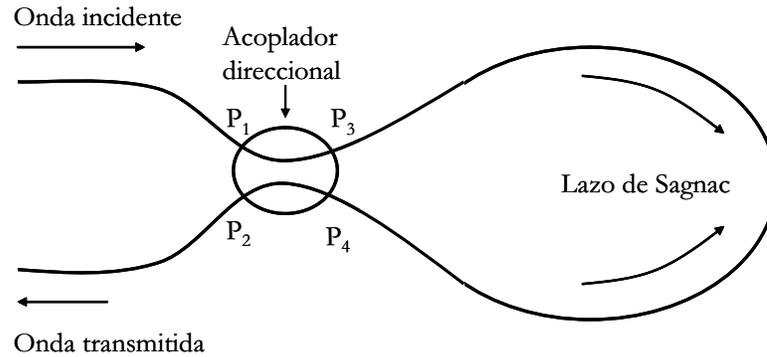


Figura 17: Interferómetro de Sagnac de fibra óptica.

La mayoría de las investigaciones sobre el análisis del interferómetro de Sagnac se han basado en el formalismo de Jones. Para emplear el cálculo de Jones se necesita determinar las matrices de Jones correspondientes a cada elemento secuencial de la trayectoria óptica que recorre un haz en el interferómetro. En primera instancia, se considera arbitraria la polarización del campo incidente por el puerto de entrada P_1

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} \quad (24)$$

En el acoplador direccional la intensidad de la luz en la entrada P_1 se divide en dos señales complementarias que dependen de la razón de acoplamiento $\beta/(1 - \beta)$ (figura 18). Suponiendo que la razón de acoplamiento del acoplador es independiente de la polarización, tenemos que la matriz de transferencia de amplitud del acoplador direccional de fibra óptica está dada por

$$C_{13} = C_{31} = C_{24} = C_{42} = \begin{bmatrix} \beta^{1/2} & 0 \\ 0 & \beta^{1/2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$C_{23} = C_{32} = C_{14} = C_{41} = \begin{bmatrix} j(1-\beta)^{1/2} & 0 \\ 0 & j(1-\beta)^{1/2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

donde C_{nm} con $n,m=1,2,3,4$ representa la matriz de transferencia entre el puerto P_n y el puerto P_m del acoplador direccional. Las ecuaciones 25 y 26 pueden ser escritas como

$$C_D = \beta^{1/2}U \quad (27)$$

$$C_A = j(1-\beta)^{1/2}U \quad (28)$$

donde U es la matriz unitaria de 2×2 , y C_D y C_A representan la propagación de la luz sobre la misma fibra (directa) y en la segunda fibra (acoplada), respectivamente.

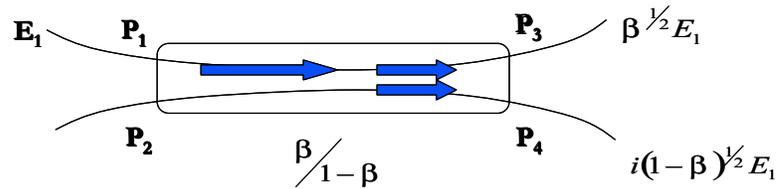


Figura 18: Acoplador direccional.

Una vez que los haces resultantes de la división del campo de entrada emergen por los puertos P_3 y P_4 , estos viajan por el lazo de fibra altamente birrefringente en direcciones opuestas y sus componentes x y y pueden recorrer diferentes longitudes de camino óptico. Podemos representar las características ópticas del lazo de Sagnac por medio de las matrices de Jones J_F , para la propagación a favor de las manecillas del reloj, y J_C para la propagación en contra de las manecillas del reloj. Para definir estas matrices debemos considerar dos elementos principales: la matriz de transmitancia T de la fibra con birrefringencia lineal, y la matriz de rotación R , esta debido a la torsión de la fibra. Estas matrices están dadas por

$$T = \begin{bmatrix} e^{i\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\varphi}{2}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

donde $\varphi = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda}$ es la diferencia de fase entre los modos de polarización introducidos por la fibra birrefringente,

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta \\ \operatorname{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (30)$$

Suponiendo que la torsión a lo largo de la fibra es pequeña de modo que no provoque acoplamiento de los modos de polarización, tenemos que las matrices de Jones para la propagación en el lazo de Sagnac están dadas por

$$J_F = R(\theta)T \quad (31)$$

$$J_C = TR(-\theta) \quad (32)$$

En principio las componentes del campo incidente, E_x y E_y , son paralelas a los ejes rápido y lento de la fibra birrefringente a la salida del puerto P_3 , respectivamente. Debido a la torsión de $\pi/2$ que se realiza en la fibra, las componentes E_x y E_y son paralelas a los ejes lento y rápido de la fibra a la salida del puerto P_4 (figura 19).

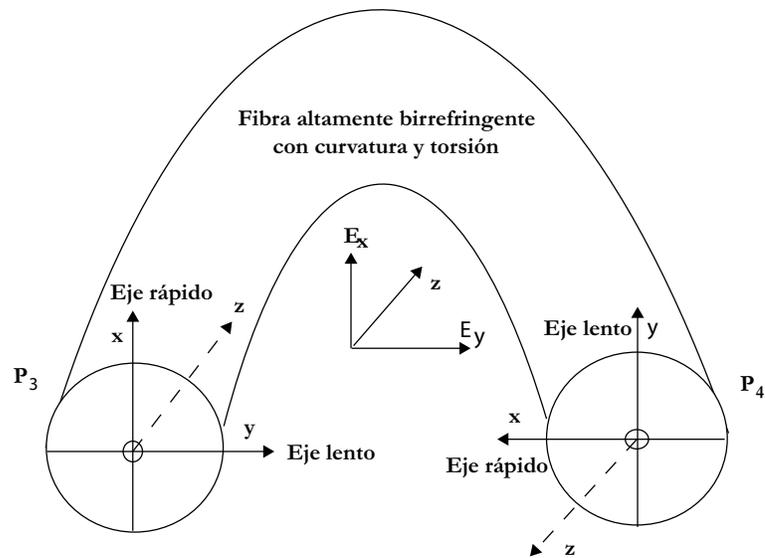


Figura 19: Sistema de ejes para representar el lazo de fibra altamente birrefringente torcido en $\pi/2$.

Dos modos de polarización se propagan a lo largo del lazo en direcciones opuestas cambiando su fase en forma desigual, debido a que las constantes de propagación son diferentes (Tapia Mercado, 2001).

IV.2.2 Arreglo Experimental

En esta sección se describe el arreglo experimental de un sensor de fibra óptica para mediciones de temperatura. El arreglo experimental consiste en una fuente de baja coherencia (un LED de emisión en el infrarrojo). La luz de la fuente es acoplada al puerto P_1 de un acoplador direccional, por medio de un microobjetivo de 10X. El acoplador tiene una razón de división de 50/50 a una longitud de onda de 780nm. Los puertos P_3 y P_4 del acoplador están conectados a los extremos de un lazo de fibra altamente birrefringente por medio de conectores mecánicos. La salida del puerto P_2 es acoplada a la entrada del espectrómetro, el cual está conectado a una cámara CCD (figura 20). La salida del sensor es registrada en una computadora, en la cual podemos apreciar la señal de salida en el dominio de longitud de onda.

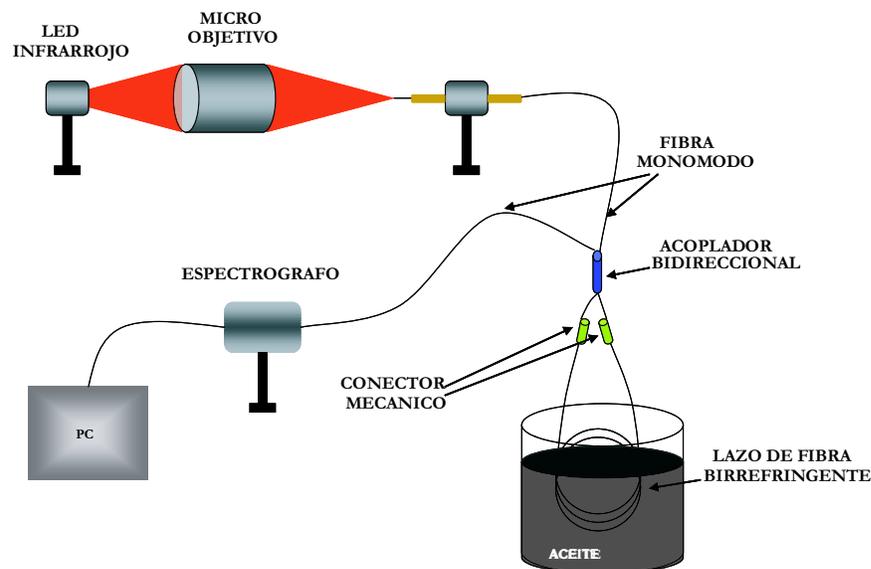


Figura 20: Arreglo experimental de un sensor de fibra óptica para mediciones de temperatura.

Para calentar la fibra y hacer las mediciones correspondientes de temperatura para

su calibración, la fibra es sumergida en aceite. Esto debido a que el agua al comenzar a calentarse presenta turbulencias, debido a burbujeo, y esto afectaría en gran manera a las mediciones. El aceite presenta una mayor estabilidad al alcanzar altas temperaturas, además de que su punto de ebullición es mucho mayor al del agua, lo cual nos permite ampliar el rango de temperaturas al que podemos hacer las mediciones.

IV.2.3 Simulación

Partiendo de las ecuaciones en la sección IV.2.1, se elaboró un algoritmo, a modo de diagrama de bloques, el cual se tomó como base para la realización de un programa en Matlab, el cual fuese capaz de simular el comportamiento del campo propagándose por el sensor, como muestra la figura 21. Recordando la nomenclatura, tenemos una matriz de rotación R , debido a la torsión de la fibra; la matriz T , la cual describe la transmitancia de la fibra con birrefringencia lineal; tenemos el vector de campo incidente E_1 , así como las ecuaciones 27 y 28 las cuales describen la transferencia en el acoplador direccional, C_D y C_A ; y por último, tenemos las ecuaciones 31 y 32, que describen la propagación en el lazo de Sagnac, J_F y J_C .

Podemos obtener la relación que describe la respuesta del interferómetro al campo de entrada mediante el cálculo del producto del vector de entrada E_1 y las matrices de Jones asociadas a cada uno de los elementos por donde pasan las ondas contrapropagantes en el interferómetro. De esta manera, y siguiendo el diagrama de bloques, obtenemos que

$$E_2^S = C_D R T C_D E_1 + C_A T R C_A E_1 \quad (33)$$

donde E_2^S es el campo a la salida del interferómetro. Suponemos que el espectro de la luz en la entrada del interferómetro $E_1(\lambda)$ tiene forma Gaussiana. Aproximamos

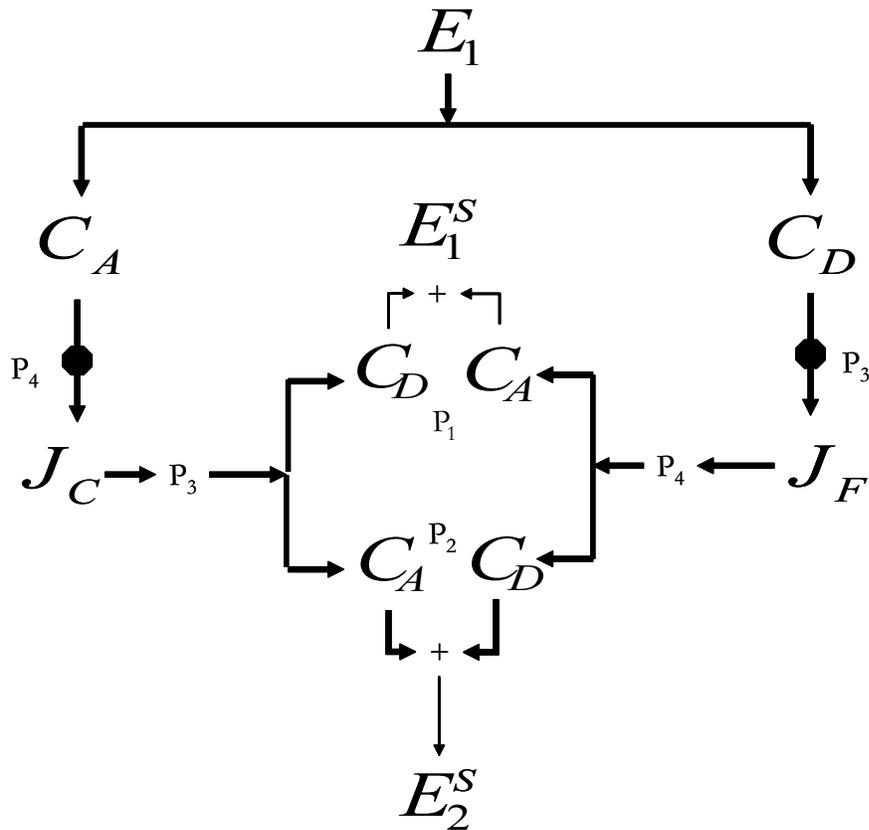


Figura 21: Diagrama de bloques que describe el interferómetro de Sagnac.

la forma utilizando una ventana Hanning, definiendo la ventana del espectro del LED entre los 750 y los 1000nm (figura 22).

Enseguida se aplicó la ecuación 33, haciendo un barrido de longitudes de onda, por lo que obtenemos una señal periódica (figura 23).

En el simulador podemos controlar el rango de longitud de onda en que el se registrarán datos del interferómetro. En este ejemplo el rango es de 800 a 900nm.

Una vez que se tienen las franjas de interferencia características del interferómetro, le agregamos la envolvente del LED, produciendo una salida como la que vemos en la figura 24.

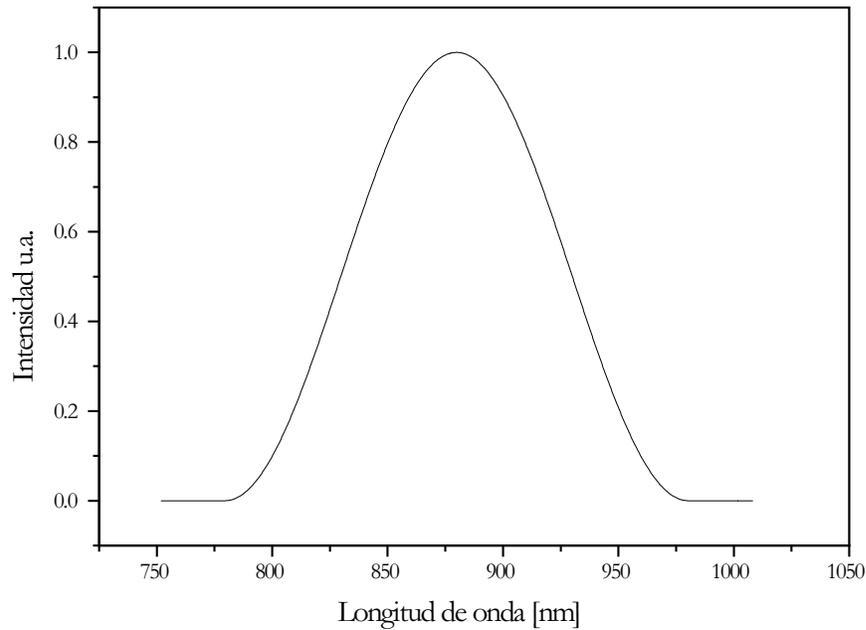


Figura 22: Espectro del LED a la entrada del interferómetro.

Otro factor de importancia a considerar en la simulación es el ruido. El modelo de ruido tiene distribución de Poisson

$$p(x, \lambda) = \frac{\lambda^x \epsilon^{-\lambda}}{x!} \quad (34)$$

De esta manera se simuló el característico ruido multiplicativo de la señal a la salida del interferómetro.

En base a distintas pruebas se comprobó la validez del método al hacer variaciones en la intensidad. A mayor intensidad el ruido era menos evidente y a menor intensidad de la señal el ruido era prominente (figuras 25 y 26). También fue considerado un factor de ruido aditivo, el cual representa el ruido blanco debido a la aleatoriedad de la conversión de fotones a electrones en la cámara CCD.

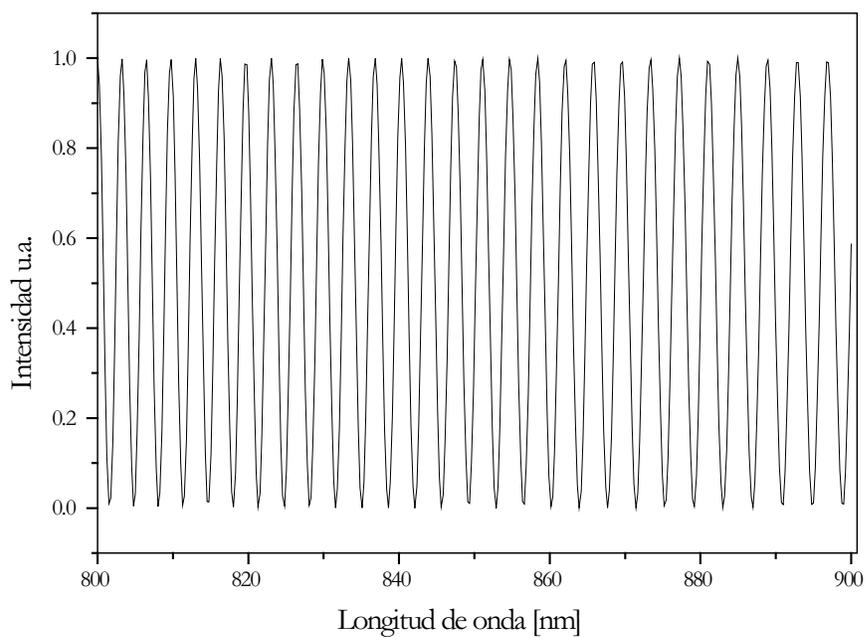


Figura 23: Señal periódica obtenida del producto del vector de campo de entrada y las matrices de Jones del interferómetro.

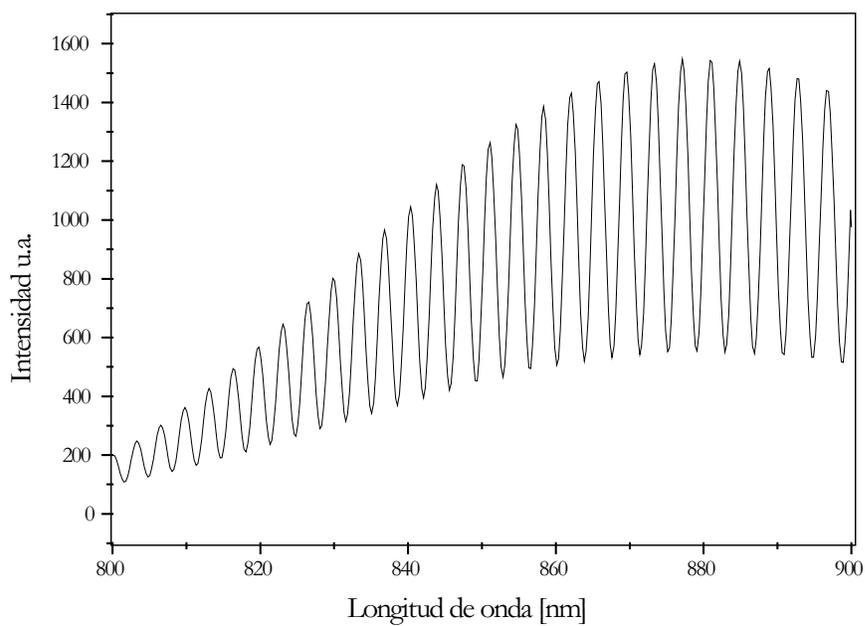


Figura 24: Simulación de una Señal de salida del interferómetro de Sagnac.

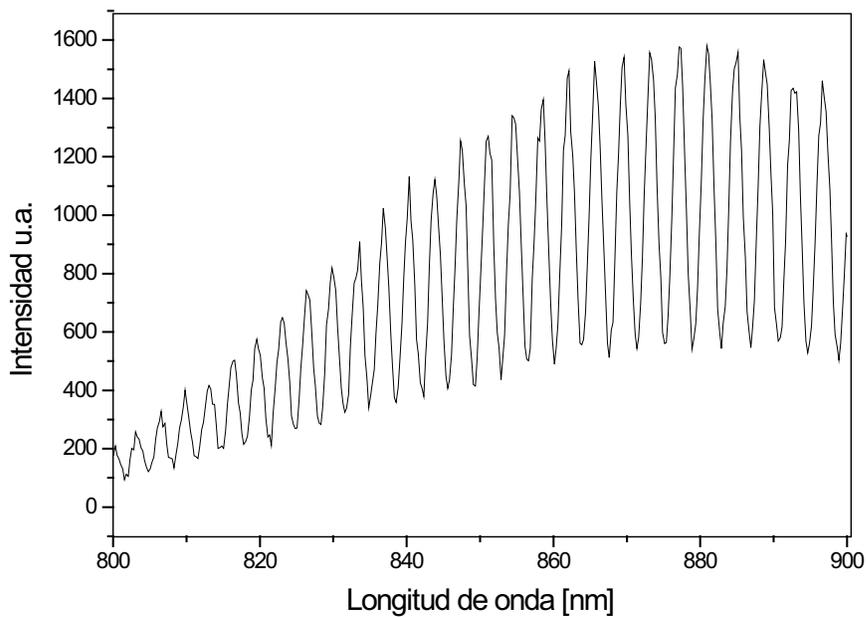


Figura 25: Señal con ruido aditivo.

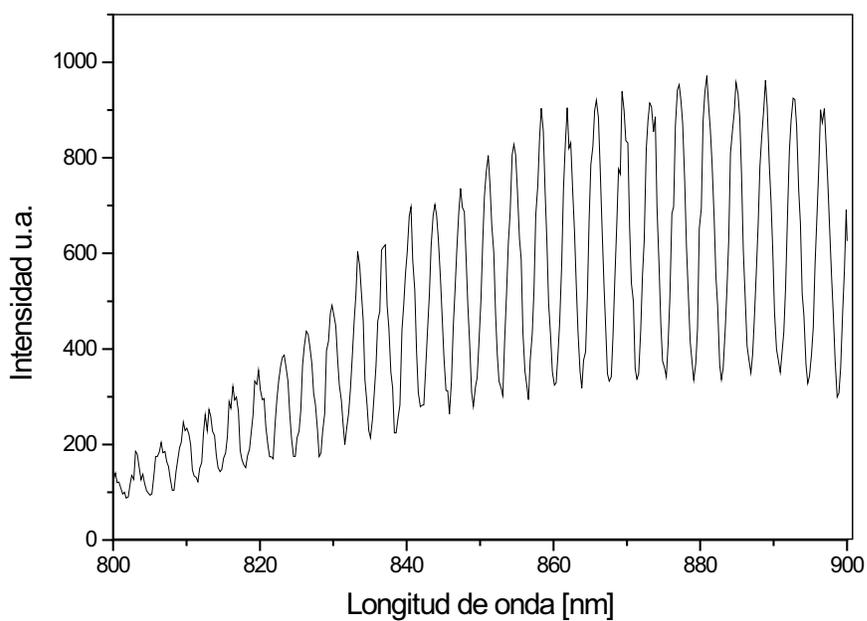


Figura 26: Señal y ruido aditivo cuando la señal tiene una baja intensidad de entrada.

IV.2.4 Procesamiento de la señal

Una vez grabado el espectro de salida del interferómetro de Sagnac por medio de un espectrógrafo con un fotodetector CCD, se debe hacer el procesamiento de los datos obtenidos. A continuación se describe el método utilizado por un programa hecho en Matlab para procesar la señal de salida. La idea principal del método es analizar el espectro y obtener la fase absoluta φ del espectro modulado por la interferometría. Esta técnica de procesamiento esta basada en la interferometría de baja coherencia usando el barrido espectral.

Como primer paso, aplicamos una ventana de suavización a la señal de salida para eliminar los máximos y mínimos falsos de la señal. Enseguida, para hacer mediciones de temperatura se calcula la fase φ de la modulación del espectro, la cual corresponde al término coseno de la ecuación 13. La extracción del término coseno se basa en el método propuesto por R. Cortés et al, 1998. Primero se calculan los dos espectro auxiliares $I_{max}(\lambda)$ y $I_{min}(\lambda)$ mediante la interpolación de máximos y mínimos del espectro de salida $I(\lambda)$, respectivamente (figura 27).

Haciendo el despeje del término coseno en la ecuación 13, podemos determinar el espectro de salida sin la modulación. La figura 28 muestra un resultado típico del cálculo del término coseno.

Para calcular el número de ciclos de la señal de salida primero convertimos las longitudes de onda en números de onda y se calcula el período de modulación del espectro del LED. Para hacer lo anterior es necesario conocer al menos dos ceros de la señal espectral del LED. El orden cero de modulación en λ_0 es calculado como

$$N = \text{round}\left(\frac{N_{12}k_1\Delta n_1}{k_1\Delta n_1 - k_2\Delta n_2}\right) \quad (35)$$

donde N_{12} es el número de ciclos entre los ceros en λ_1 y λ_2 , k es el número de onda,

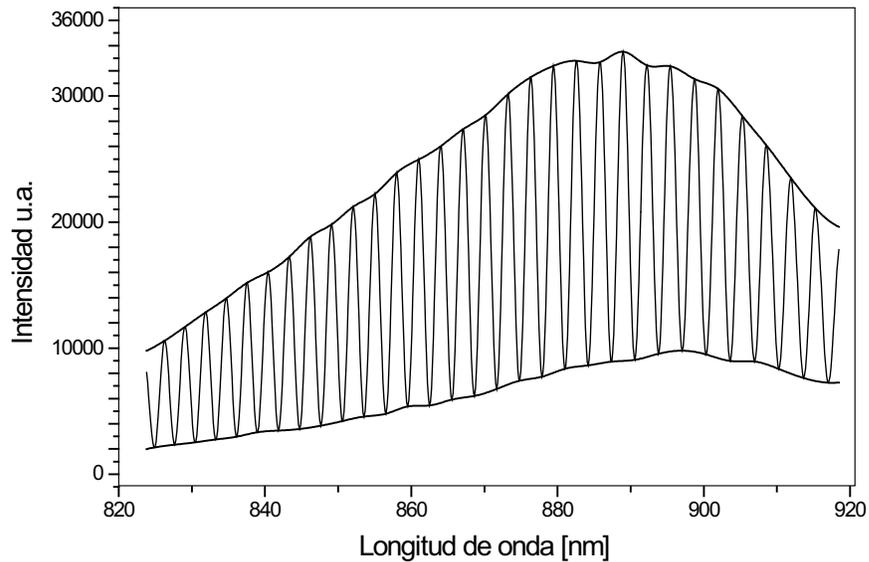


Figura 27: Interpolación de máximos y mínimos que nos da una envolvente de la señal de salida.

$k = 2\pi/\lambda$ y Δn es la birrefringencia en λ_i . Así, la fase en λ_0 esta dada por

$$\varphi = \frac{\Delta n_0}{k_1 \Delta n_1} \left[N + \frac{1}{4} \right] \quad (36)$$

IV.3 Medición de la sensibilidad e incertidumbre del sensor de temperatura

Por medio de un análisis estadístico fue posible encontrar algunos parámetros óptimos para ser aplicados en el arreglo experimental. Para determinar la incertidumbre en las mediciones experimentales, en el artículo publicado por Juan Tapia (J. Tapia Mercado, 2001), se determina la incertidumbre de las mediciones de temperatura con un sensor interferométrico de fibra óptica, grabando el espectro a la salida del sensor un total de 160 veces con intervalos de 0.5 segundos entre cada medición. Cada espectro grabado fue procesado para localizar dos ceros de la señal periódica, lo que permite calcular

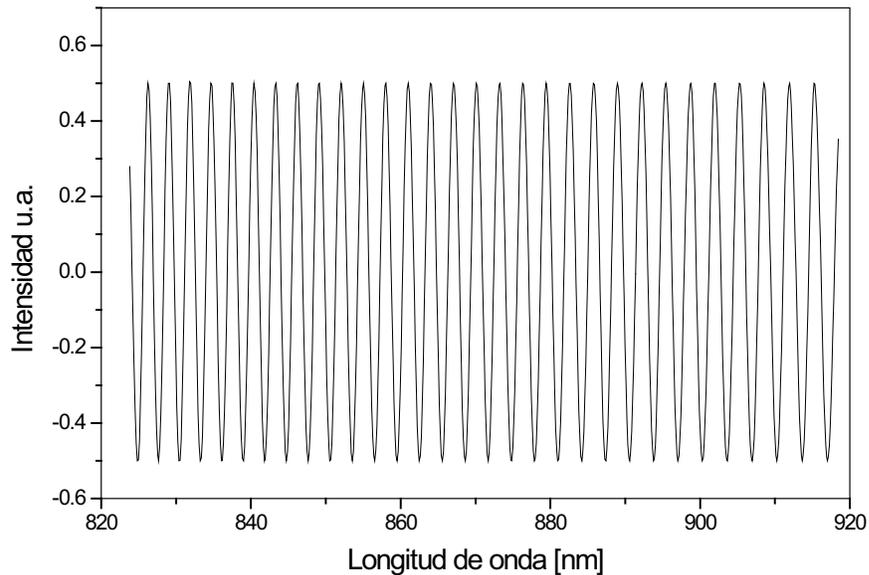


Figura 28: Espectro de salida después del procesamiento.

la fase del espectro de modulación, φ . La incertidumbre de la ubicación de cada cero (incertidumbre de λ) fue calculada como la desviación estándar de la media para 160 espectros grabados. Estas pruebas se hicieron para distintas longitudes de la fibra birrefringente. La longitud inicial de la fibra fue de 84cm, y después de experimentar con esta longitud se cortó la fibra secuencialmente. El procedimiento experimental fue simulado en el presente trabajo, pudiendo aumentar la cantidad de longitudes de fibra y comparar con los resultados experimentales. El resultado se muestra en la figura 29. También por medio de simulación numérica se pudo encontrar la incertidumbre de λ para distintos tamaños (en pixeles) de la ventana de suavización que es aplicada durante el procesamiento (figura 30).

Tomando la fibra de 12cm, se hizo el cálculo de la incertidumbre de λ dependiendo de la cantidad de muestras (espectros de salida) tomadas (figura 31).

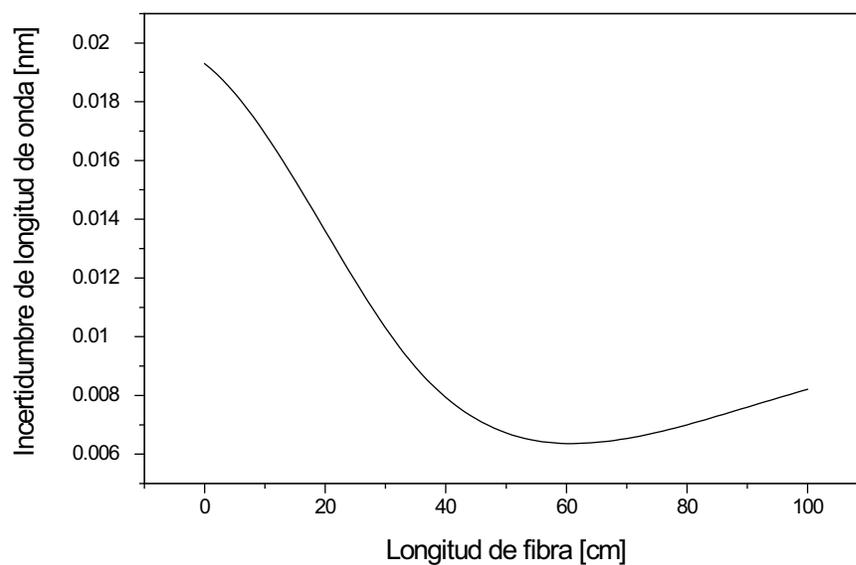


Figura 29: Resultado de simulación: Dependencia de la incertidumbre de λ con la longitud del lazo de fibra altamente birrefringente.

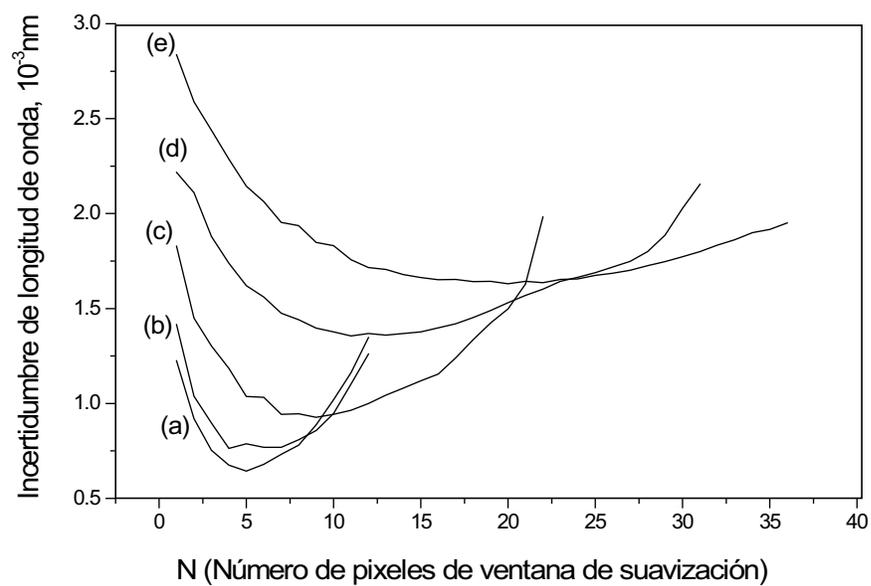


Figura 30: Ventanas de suavización.

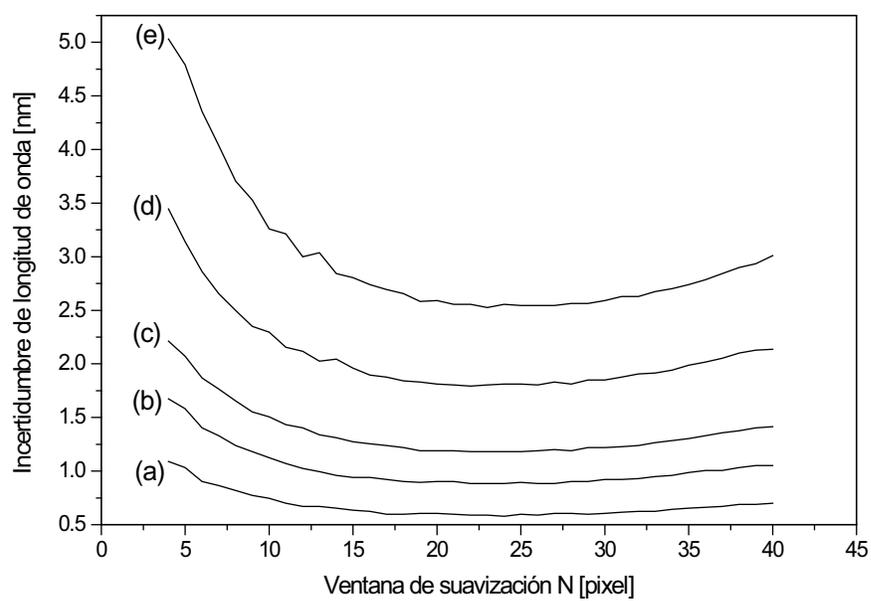


Figura 31: Incertidumbre de λ respecto a la cantidad de muestras.

IV.4 Conclusiones

Se ha mostrado el sensor de temperatura de fibra óptica basado en un interferómetro de lazo de fibra birrefringente con un LED como fuente de luz. El sensor muestra completa independencia a la polarización de la luz lo cual permite el uso de luz no polarizada y fibras conectoras de bajo costo. También, se mostró un método altamente exacto para el procesamiento de datos espectrales. El método de procesamiento de datos usado puede ser implementado para monitorear otros parámetros físicos que afecten la birrefringencia de la fibra óptica, tales como esfuerzos y presión. Se desarrolló un simulador de un sensor interferométrico de fibra óptica, con el cual se pueden manipular los distintos parámetros del sensor que afectan la propagación del campo en la fibra óptica. Se mostró la efectividad del simulador haciendo comparación de la incertidumbre de λ con resultados obtenidos experimentalmente en trabajos previos.

Capítulo V

Sensor dual elaborado con dos lazos de Sagnac

V.1 Introducción

Debido a que la mayoría de los materiales reaccionan con la humedad de la atmósfera, la medición de esta se ha convertido en un tema de suma importancia tanto para la ciencia como para la industria. Esta reacción de los materiales a la humedad da lugar a cambios en las características químicas, físicas y eléctricas del material. Existe una amplia gama de técnicas para la medición de humedad basadas en diferentes efectos o fenómenos físicos que dependen de la humedad, como por ejemplo, sonido, cambio de la constante dieléctrica del gas, o absorción de la luz en longitudes de onda seleccionadas. Una de las técnicas más sencillas y conocidas es la de bulbo húmedo/bulbo seco, la cual se basa en el efecto de cambio de la temperatura del bulbo húmedo debido a la evaporación. El psicrómetro de bulbo húmedo es un instrumento que determina la humedad midiendo la temperatura ambiente (bulbo seco) y la temperatura de una fuente de agua en evaporación (bulbo húmedo). Al evaporarse el agua, el vapor extrae de los alrededores una cantidad de calor que resulta en la diferencia entre la temperatura de los dos bulbos. La diferencia depende de la humedad del aire y la temperatura ambiente. La implementación de esta técnica con sensores de fibra óptica es directa; un sensor dual de temperatura puede medir de forma simultánea la temperatura ambiente y la temperatura de una fuente de agua en evaporación. Entre las ventajas que ofrece un sensor dual de fibra óptica para las mediciones de humedad, están la flexibilidad, el

bajo peso y un funcionamiento seguro en un ambiente hostil, entre otras. Además, los sensores de temperatura de fibra óptica ofrecen una alta sensibilidad. Entre las metas del presente trabajo está el desarrollo de un prototipo del psicrómetro de fibra óptica y la demostración de su funcionamiento.

V.2 Arreglo experimental

Siguiendo un esquema similar al sensor de temperatura de fibra óptica con un solo lazo de Sagnac, agregamos un segundo lazo en serie por medio de un segundo acoplador bidireccional, como se ilustra en el figura 32.

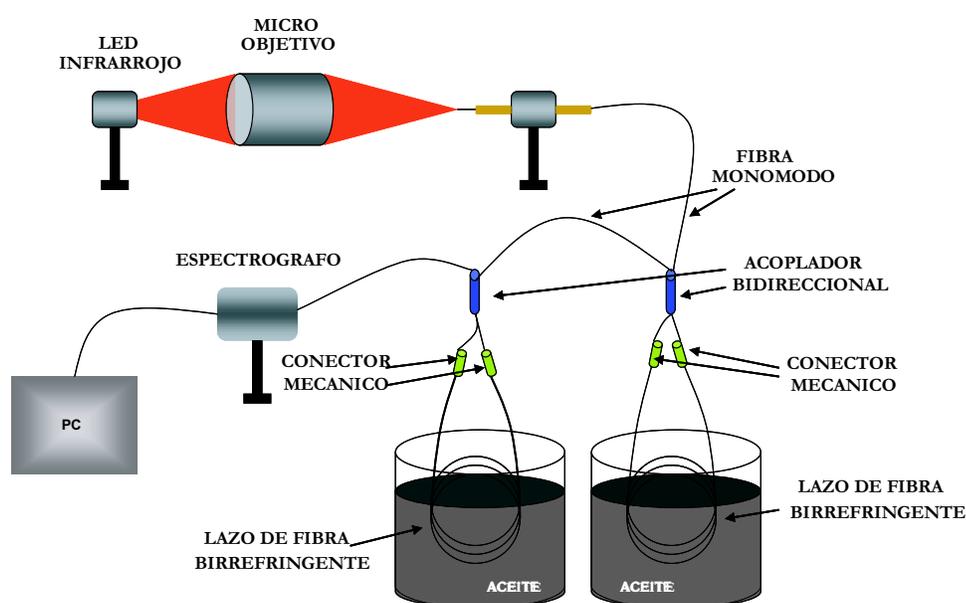


Figura 32: Arreglo experimental del sensor dual de fibra óptica.

El objetivo de estas pruebas preliminares fue conseguir una buena calibración, con la cual definiríamos las longitudes óptimas para hacer las pruebas para medición de humedad. De acuerdo a los cálculos hechos por simulación (figura 29) sabemos que la longitud óptima de la fibra para reducir la incertidumbre de λ esta entre los

30 y 60 cm aproximadamente, por lo cual se decidió a tomar las longitudes de ambas fibras alrededor de estos valores. Para las primeras pruebas, el sistema consistió en dos lazos de Sagnac con longitudes de 35.5 y 51.5 cm. Los acopladores direccionales ambos son 50/50, y los conectores mecánicos también son iguales. Al igual que en el arreglo experimental anterior (figura 20) se usó aceite con el fin de mantener una mejor estabilidad en las mediciones.

V.3 Simulación

Con el fin de comparar resultados ideales con los experimentales, hacemos uso del simulador utilizado anteriormente en IV.2.3, haciendo la misma modificación que en el caso del arreglo experimental, es decir, agregamos las matrices de Jones para un segundo lazo de Sagnac en serie. El arreglo de dos lazo en serie da como resultado que a la salida del sensor tengamos el producto de dos señales (figura 33).

En el simulador de dos lazos podemos manipular los mismos parámetros que para el simulador de un solo lazo: la longitud de ambas fibras, la intensidad de la luz de entrada, el factor de acoplamiento de ambos acopladores y el ruido. En el caso de la manipulación del ruido, una señal con SNR elevado se acercaría mucho más a las señales obtenidas experimentalmente (figura 34).

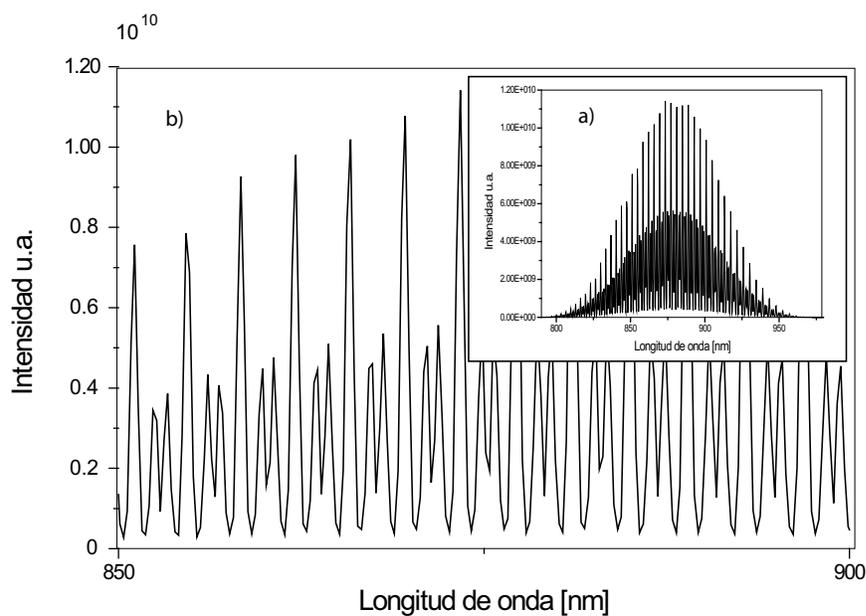


Figura 33: a) Señal simulada obtenida a la salida de un sensor de dos lazos de Sagnac en serie; b) Acercamiento a la señal, en un rango de 50nm

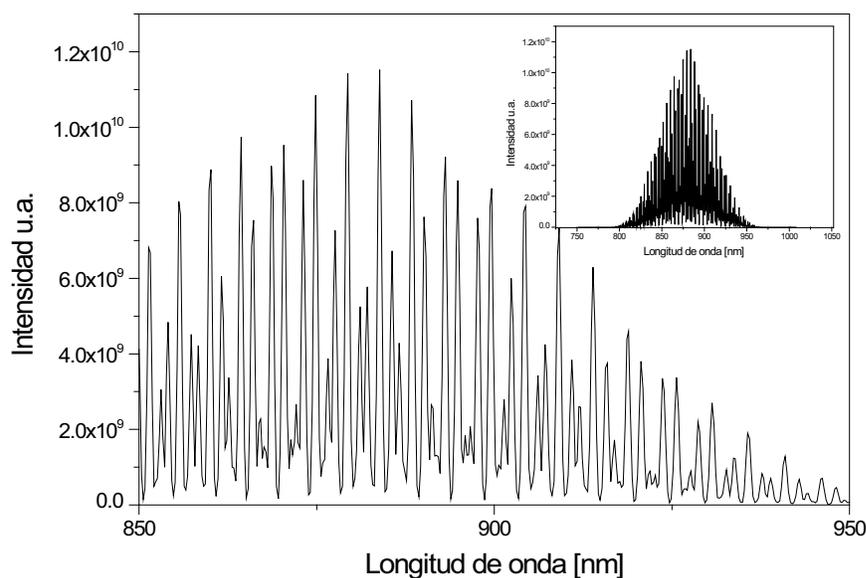


Figura 34: a) Señal simulada con ruido obtenida a la salida de un sensor de dos lazos de Sagnac; b) Acercamiento a la señal, en un rango de 100nm

V.4 Procesamiento de señales

Como pudimos observar en las señales de salida del sensor interferométrico de fibra óptica con dos lazos de Sagnac, la multiplicación de las señales provenientes de ambos lazos nos da como resultado una señal modulada. A través del procesamiento de señales simuladas podemos comparar los resultados que se obtienen experimentalmente. En base a las señales simuladas, se desarrolló una metodología de procesamiento de señales, las cuales son producto de la multiplicación de dos señales. Enseguida se prosiguió a utilizar el mismo algoritmo para las señales obtenidas experimentalmente.

Como vimos en IV.2.4, calculando el período de la señal podemos encontrar el defasamiento provocado por el cambio de las propiedades de la luz que se propaga a través de la fibra al cambiar esta su temperatura. En el caso anterior, de un solo lazo de Sagnac, el método para calcular dicho cambio de fase estaba basado en el algoritmo explicado en la sección IV.2.4. Pero para el caso de una señal modulada este algoritmo no nos es útil. Por ello, un nuevo algoritmo fue desarrollado para procesar señales de un sensor dual, el cual esta basado en un procesamiento del espectro de Fourier.

Como primer paso debemos separar las señales correspondientes a cada lazo. En la figura 35 tenemos una señal obtenida en el laboratorio con el arreglo experimental presentado en la sección V.2. Haciendo la transformada de Fourier de la señal de salida del interferómetro obtenemos dos picos máximos y un par de picos parásitos, como se ve en la figura 36.

Los picos máximos corresponden a las frecuencias de modulación de la señal de cada sensor y los picos parásitos son la suma y diferencia de las frecuencias de los sensores.

Para poder hacer el cálculo de la fase de ambos sensores, es necesario aislar los picos que corresponden a cada uno de los sensores y procesarlos de manera independiente.

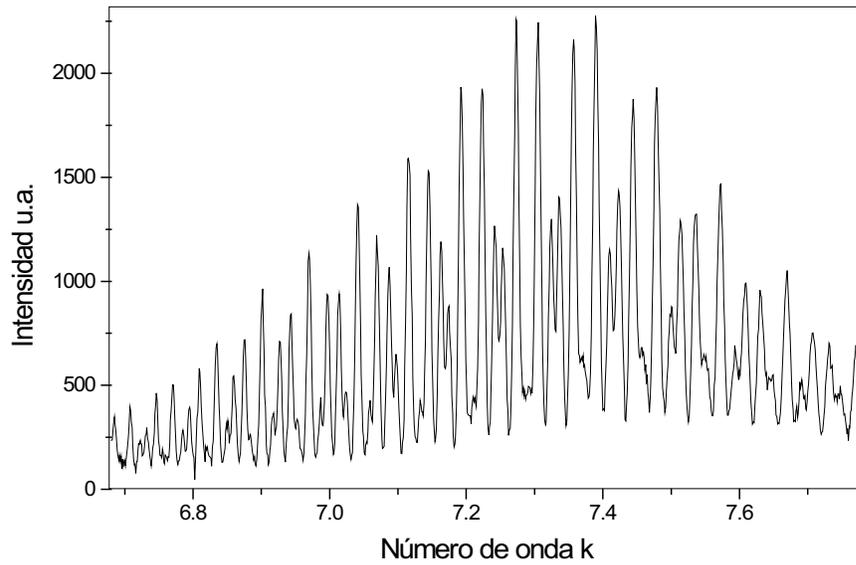


Figura 35: Señal obtenida a la salida del sensor dual de fibra óptica.

Para ello, utilizamos filtros en el espectro de Fourier de la señal a la salida del interferómetro. En la figura 37 se muestran ambos picos con un filtro del mismo ancho en ambos, donde F1 corresponde al filtro para el sensor 1, mientras que el filtro F2 corresponde al sensor 2.

Esto se hace para cada una de las muestras, las cuales indican un grado de temperatura que varía con el tiempo. En este caso, se trabajaron con 100 muestras tomadas cada segundo durante el enfriamiento del aceite donde estaban contenidos los lazos de fibra altamente birrefringente.

Una vez aislado cada pico, se procede a obtener su fase: primero se saca su transformada de Fourier inversa de manera que la señal cosenoidal correspondiente a un sensor quede reconstruida, y después, utilizando funciones de Matlab se calcula la fase de las señales (figura 38).

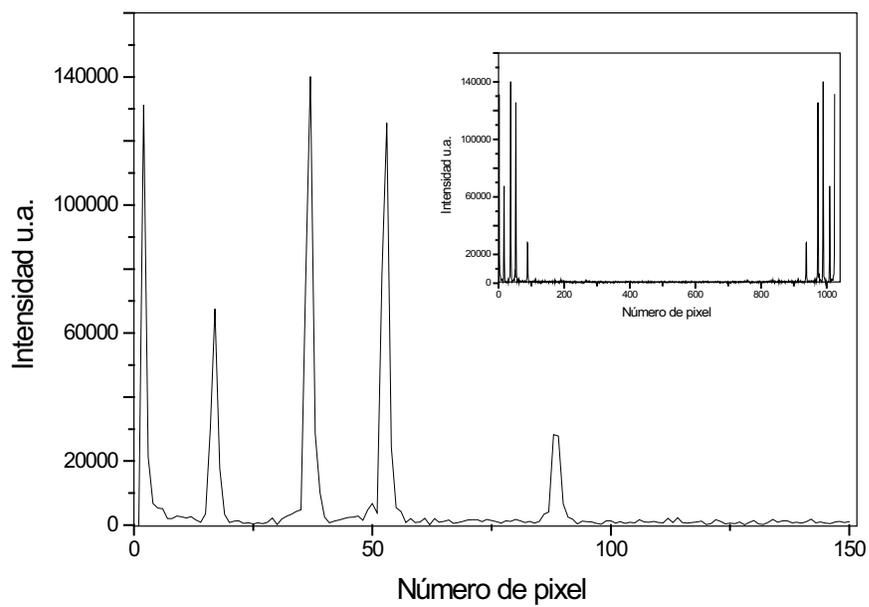


Figura 36: Transformada de Fourier de la señal de salida del sensor.

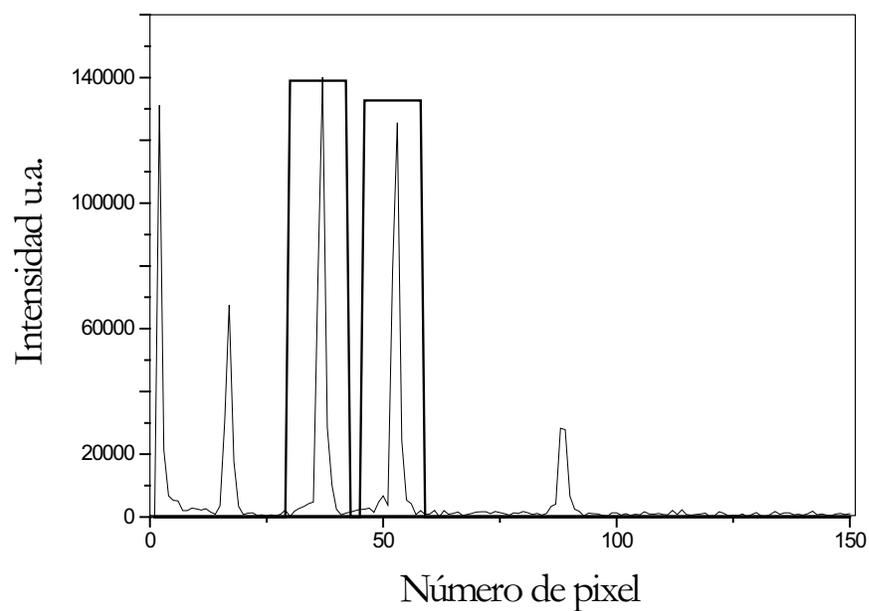


Figura 37: Filtraje de los picos que corresponden a cada sensor.

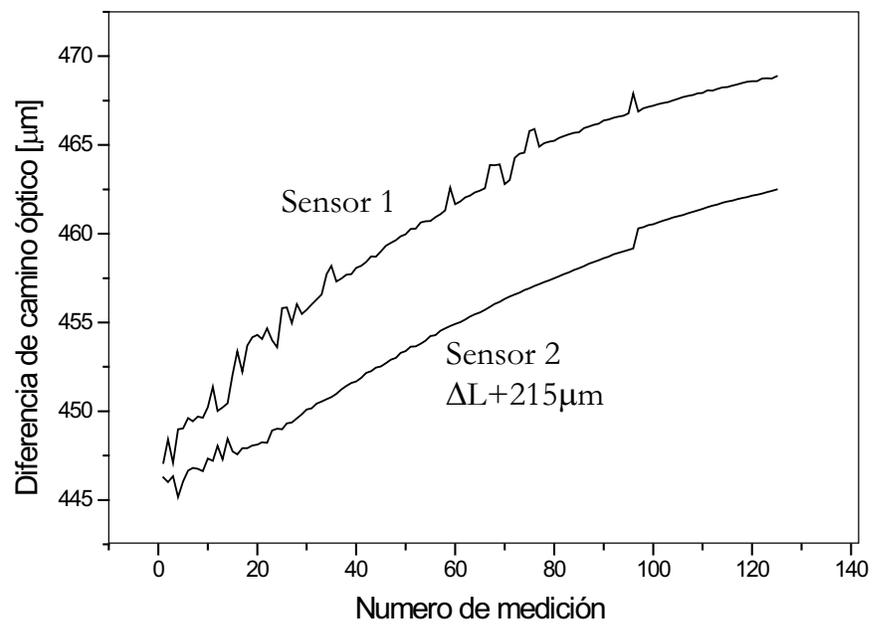


Figura 38: Diferencia de camino óptico tomado para 100 muestras.

V.5 Resultados experimentales

Como siguiente etapa se prosiguió a hacer experimentos de mediciones de humedad. El arreglo experimental sufrió algunos cambios, como lo muestra la figura 39. Ahora ambos lazos están dentro de un contenedor de vidrio vacío (ya no se sumergen en aceite), y se incrementa la temperatura del contenedor para hacer la calibración de ambos lazos. Después uno de los lazos es cubierto con un pedazo de tela húmeda, y se apaga el hornillo para dejar enfriar el contenedor. De manera simultanea se tomaron los datos de temperatura y humedad en los sensores de fibra óptica y los sensores electrónicos.

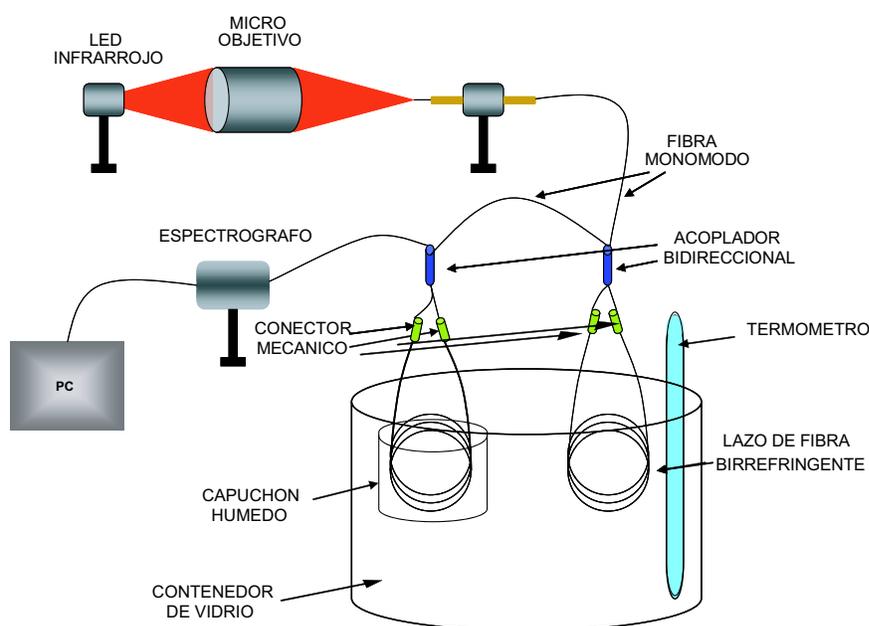


Figura 39: Arreglo experimental para mediciones de humedad.

El primer experimento consistió en una medición de la temperatura ambiente con cada sensor de fibra óptica y un sensor electrónico comercial. Con este experimento se pretendió verificar el funcionamiento del sensor, estimar la incertidumbre en la medición

de temperatura, y precisar la razón entre las longitudes de las fibras de cada sensor, L_1/L_2 . En la figura 40 se muestran los resultados de las mediciones con el sensor electrónico.

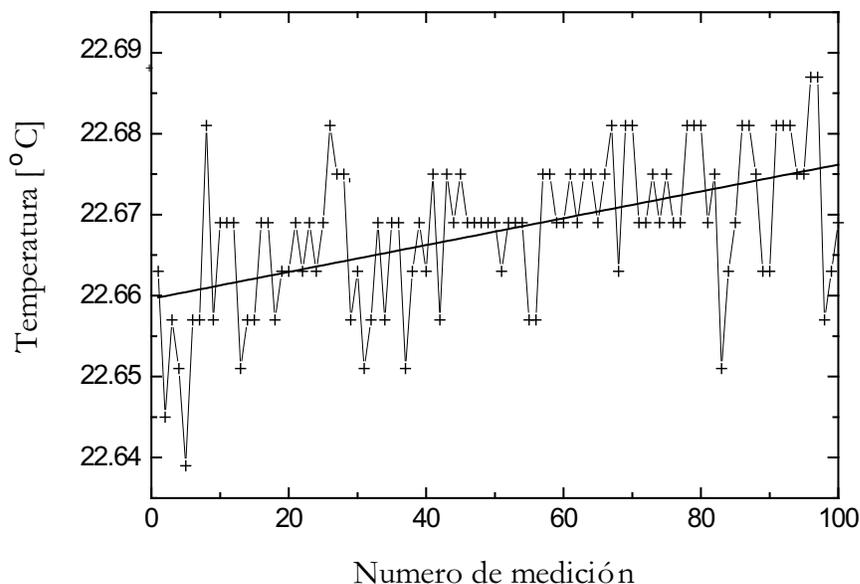


Figura 40: Temperatura ambiente vs. número de medición.

Fueron tomadas 100 muestras, con intervalo de 5 segundos entre cada medición. Usando el método de mínimos cuadrados podemos hacer un ajuste lineal de los datos obtenidos experimentalmente, como lo muestra la figura 40. Podemos ver que la temperatura no es estable durante el experimento, teniendo un cambio del orden de 0.01°C en un lapso de 10 minutos. Además, los datos permiten estimar la incertidumbre estándar del termómetro electrónico que está definida por

$$\delta T = \left[\frac{1}{N-1} \sum (T_k - \bar{T})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

donde T_k es la temperatura obtenida en la muestra k , N es el número total de

mediciones, y \bar{T} es la medida aritmética o promedio de las N muestras suponiendo que el valor de la temperatura es constante. En nuestro caso, el valor de la temperatura no es constante durante el experimento por lo tanto el valor de \bar{T} es tomado del ajuste lineal en cada instante, lo que permite obtener una estimación mas realista de la incertidumbre.

La estimación de δT con los datos presentados en la figura 40 es 0.01°C , lo cual concuerda con las especificaciones presentadas por el fabricante del sensor.

En la figura 41 se muestran los resultados del cálculo de la diferencia de camino óptico de los modos de polarización. Estos datos fueron tomados al mismo tiempo que las mediciones de temperatura mostrados en la figura 40.

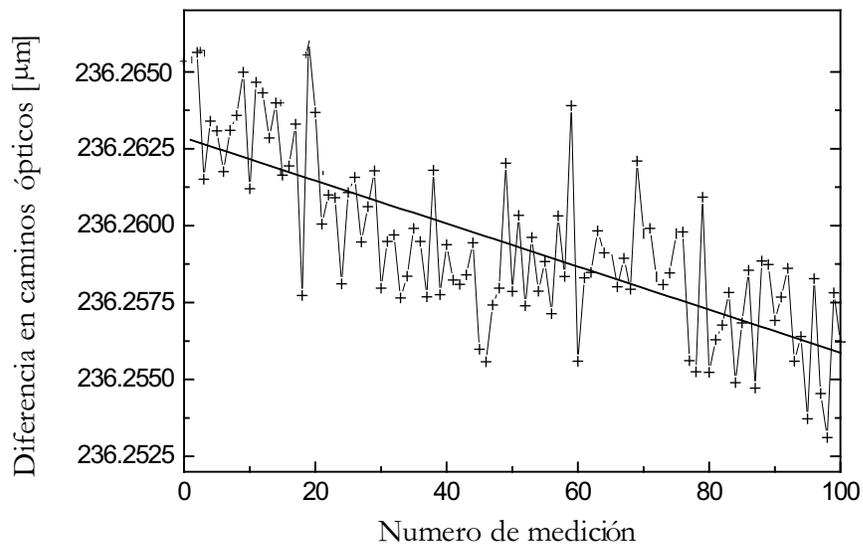


Figura 41: Diferencia de caminos ópticos vs. numero de medición.

Los resultados presentados son para el sensor 1, con una longitud del lazo de fibra de 51.5cm, y simultáneamente vemos su ajuste lineal. Podemos ver que el valor promedio de la diferencia de caminos ópticos cambió con el tiempo debido al cambio de temperatura. El aumento en la temperatura mostrado en la figura 40

provoca una disminución en la birrefringencia de la fibra en un valor alrededor de $0.007\mu m$. La estimación de la incertidumbre usando la ecuación 37 da como resultado $\delta(\Delta L) = 0.002\mu m$.

La razón entre las diferencias de camino óptico calculadas para los sensores 1 y 2 es de 1.44533. Este valor concuerda con la razón entre las longitudes de los lazos de fibra birrefringente $L_1/L_2 = 51.5/35.5 = 1.45$.

El segundo experimento consistió en la calibración de ambos sensores. Para esto se colocaron los sensores en un recipiente de vidrio el cual fue calentado y dejado enfriar mientras se tomaban los datos. Los resultados del cálculo de la diferencia de camino óptico de los modos de polarización para los sensores 1 y 2, que corresponden a distintas temperaturas, son mostrados en la figura 42.

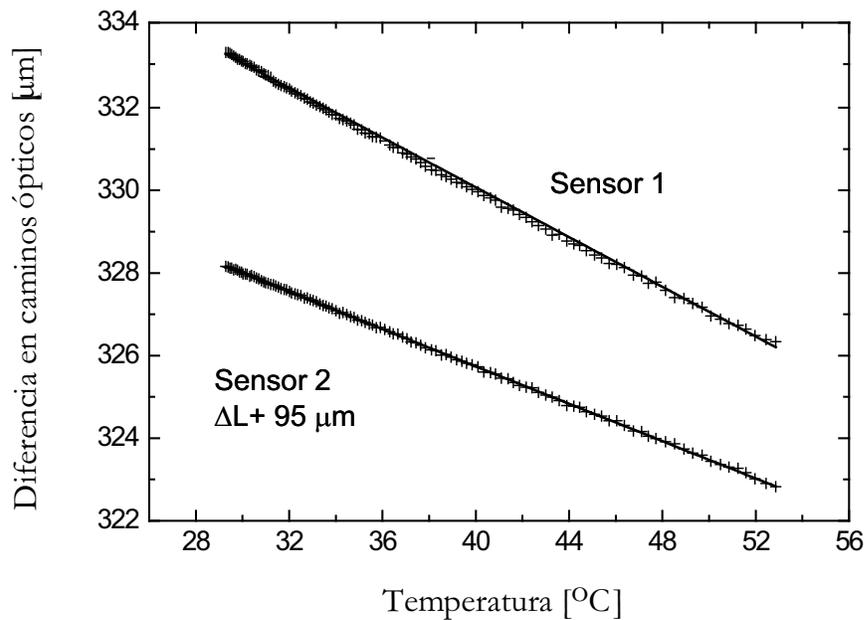


Figura 42: Diferencia de camino óptico vs. temperatura ambiente.

Es bien conocido que la respuesta de un sensor interferométrico con fibra altamente birrefringente como elemento sensible, es perfectamente lineal (R. Cortés, 1998). Por

lo tanto, para la calibración se los sensores los datos experimentales fueron ajustados por medio de la función lineal de mínimos cuadrados, usando la función "polyfit" de Matlab. Como resultado de este ajuste se obtuvieron las fórmulas para el cálculo de temperatura usando los valores de las diferencias de camino óptico. Para el sensor 1 tenemos

$$t_1 = 1060.4 + 4.4223 \cdot \Delta L_1, \quad (38)$$

y para el sensor 2 tenemos

$$t_2 = 1135.6 + 3.3199 \cdot \Delta L_2, \quad (39)$$

donde ΔL_1 y ΔL_2 son las diferencias de camino óptico para el sensor 1 y 2, respectivamente. La calibración de los sensores permitió determinar la sensibilidad de cada sensor. Por definición, la sensibilidad es el cambio de la respuesta de un sensor (en este caso es la diferencia de camino óptico) que corresponde a una unidad de cambio del parámetro que estamos midiendo. En nuestro caso la unidad de sensibilidad es $\mu m/^\circ C$. Por las ecuaciones 38 y 39 sabemos que la sensibilidad para los sensores es de $S_1 = 0.2261$ y $S_2 = 0.3199 \mu m/^\circ C$.

La figura 43 muestra los resultados de la calibración de los sensores de fibra óptica y con este resultado queda demostrado que ambos sensores pueden funcionar de forma simultanea. Para fines de comparación, en la figura se desplazaron hacia arriba por $1^\circ C$ los datos del sensor 1.

El último experimento tuvo como objetivo el demostrar que el sensor dual de fibra óptica puede ser utilizado como sensor de humedad. En el arreglo experimental se cubrió el sensor 2 con un capuchón de tela húmeda de manera que ahora exista una diferencia de temperatura entre los sensores 1 y 2. Esta diferencia de temperaturas

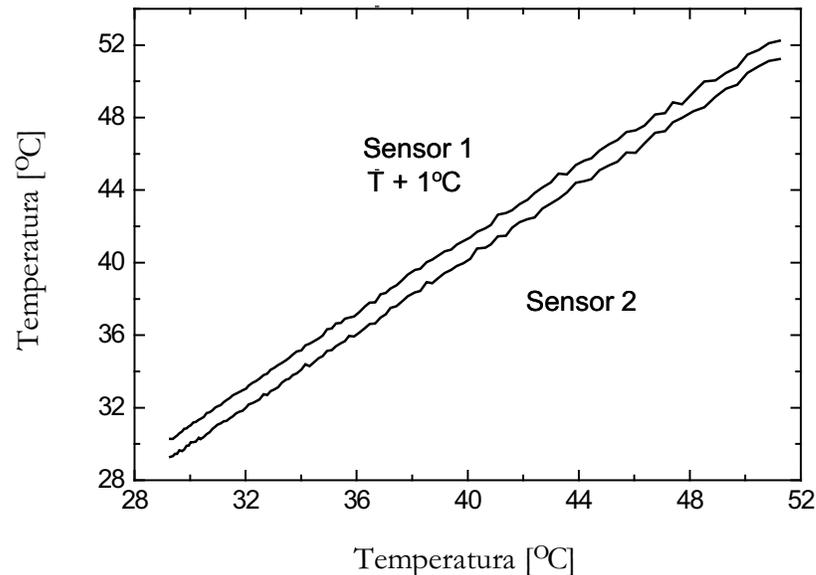


Figura 43: Temperatura medida para los sensores 1 y 2 vs. temperatura medida por el sensor electrónico comercial.

depende de la humedad del aire y de la temperatura de los sensores, como se muestra en la figura 44. Para generar la figura 44 utilizamos los datos encontrados en http://www.cis-online.co.za/tables/rh_tables.htm.

Para desarrollar el sensor de humedad automático hacemos una aproximación de los datos presentados en la figura 44

$$H = 100 - 7.6 \cdot \Delta T + 0.1 \cdot \Delta T(T_1 - 20) \quad (40)$$

donde H es la humedad relativa, T_1 es la temperatura del sensor seco (en nuestro caso el sensor 1), y ΔT es la diferencia entre las temperaturas del sensor seco y el sensor húmedo (sensor 2). La ecuación 40 fue obtenida por un ajuste de las esquinas de la superficie en la figura 44, marcadas con un círculo a una superficie plana (aproximación lineal de los datos). En otros puntos los errores de aproximación no sobrepasan el 2% de la humedad relativa. La ecuación 40 y en conjunto con las ecuaciones 38 y 39 nos

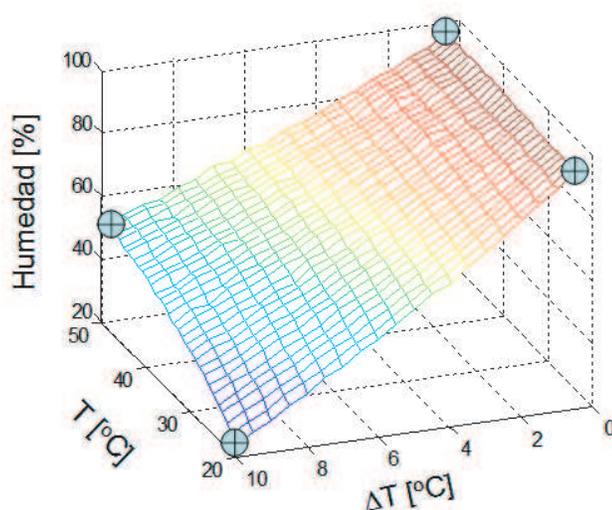


Figura 44: Humedad relativa como función de la temperatura T y la diferencia en temperaturas ΔT medidos por un termómetro seco y uno húmedo.

permite calcular la humedad usando los valores de diferencias de camino óptico que fueron calculados con el programa de procesamiento de datos.

En la figura 45 se presentan las temperaturas de los dos sensores de fibra óptica en medición de humedad. Esto permite comparar las temperaturas medidas por los dos sensores y el termómetro electrónico. Podemos ver que los valores de temperatura obtenidos por el sensor 1 son iguales a los valores obtenidos con el termómetro electrónico, mientras que la temperatura del sensor 2 es diferente y la diferencia depende de la temperatura ambiente.

Usando la ecuación 40 y los valores de temperaturas presentados en la figura 45 se hace el cálculo de humedad. En la figura 46 se muestra una comparación de los valores

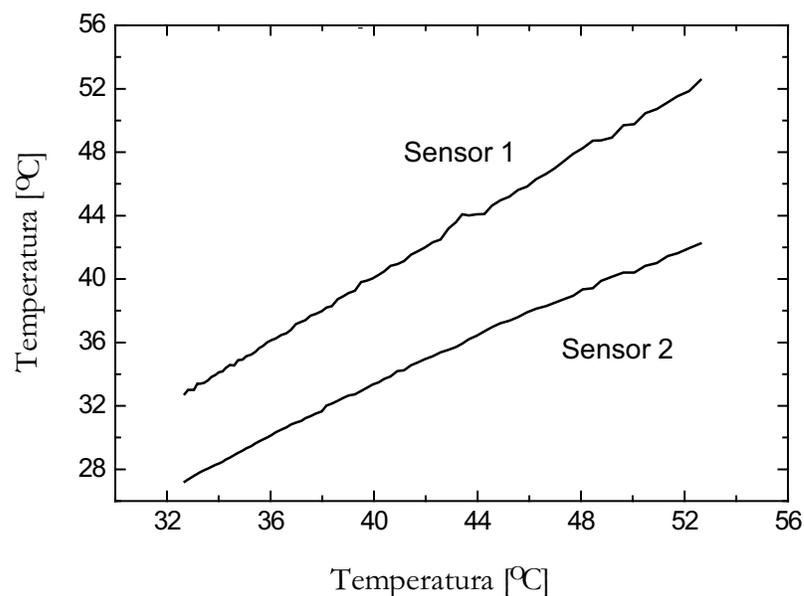


Figura 45: Temperaturas medidas por los sensores 1 y 2 como función de la temperatura ambiente en el experimento de medición de humedad.

obtenidos y los datos arrojados por el sensor de humedad comercial. Podemos ver una concordancia de los valores obtenidos con el sensor comercial y el sensor dual de fibra óptica. El error en la comparación de estos valores es menor al 4%, sin embargo, queda claro que la precisión del sensor de fibra óptica es menor que la precisión del sensor de humedad comercial.

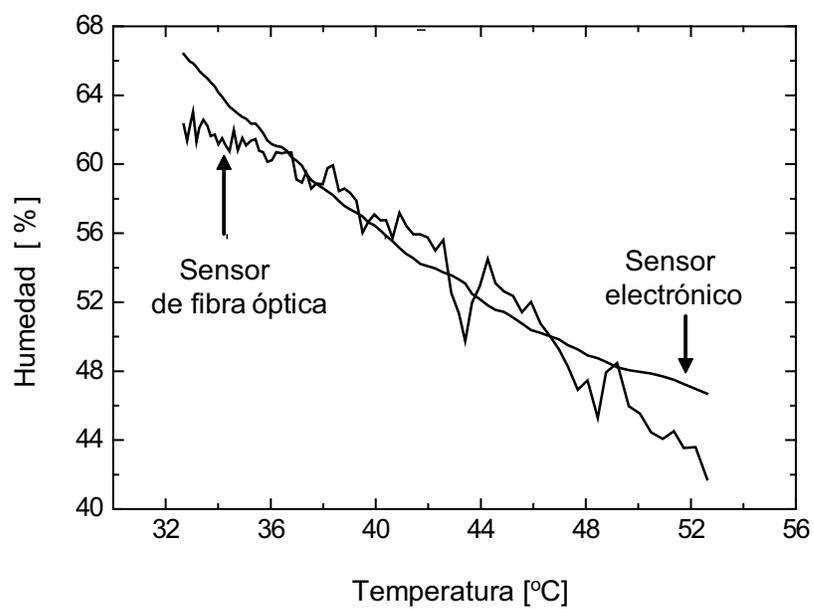


Figura 46: Comparación de los valores de humedad obtenidos por el sensor de fibra óptica con los datos del sensor comercial.

Capítulo VI

Conclusiones

En esta tesis se presentó el desarrollo e investigación experimental y mediante simulación numérica de un sensor dual de fibra óptica basado en interferometría de baja coherencia. Los resultados principales de este trabajo se enumeran a continuación:

- Se desarrolló un simulador de un sensor de fibra óptica basado en la interferometría de baja coherencia, formado por un interferómetro de Sagnac con un lazo de fibra altamente birrefringente. El simulador nos permitió investigar la manera en que las principales características del sensor dependen de los parámetros de sus componentes, tales como la longitud de la fibra birrefringente, resolución del espectrómetro, la razón señal/ruido y el rango espectral de la fuente de luz. Los resultados obtenidos en esta tesis coinciden en gran medida con los resultados experimentales obtenidos anteriormente (Tapia Mercado, 2001).
- El desarrollo de un simulador en base a un modelo de sensor de fibra óptica, nos permitió desarrollar un simulador de sensor dual que fue utilizado para generar numéricamente señales con diferentes características y que fueron utilizadas para crear el método de procesamiento de señales de un sensor dual.
- Se desarrolló un prototipo de un sensor dual de fibra óptica para mediciones de temperatura y se comprobó que puede funcionar igual a un psicrómetro (sensor que mide la humedad relativa del aire). El principio de medición en el que se basa el psicrómetro es en la medición simultánea de las diferencias en temperatura de

un termómetro seco y un termómetro húmedo. Los resultados experimentales obtenidos muestran el potencial de aplicación del sensor dual de fibra óptica para las mediciones de humedad.

- Se desarrolló una metodología sencilla para los experimentos con el sensor de humedad con el fin de conseguir una calibración del sensor.

Los resultados experimentales y numéricos obtenidos en el presente trabajo nos permitieron detectar los principales problemas por resolver en el futuro desarrollo de los sensores duales basados en la interferometría de baja coherencia, así como proponer algunas recomendaciones para la solución de dichos problemas.

- Los resultados obtenidos numérica y experimentalmente muestran una inestabilidad en el caso de señales con una relación señal/ruido muy baja. Esta inestabilidad se manifiesta con una serie de brincos en la diferencia de caminos ópticos asociados con la estimación de la fase absoluta. Esta estabilidad debe ser investigada mas a fondo para determinar los niveles aceptables de SNR, y determinar los factores principales que provocan inestabilidad en el procesamiento de las señales. Entre algunos factores que podemos mencionar están la exactitud de calibración del espectrómetro y la potencia de la fuente de luz.
- El análisis de los resultados obtenidos en la investigación del sensor de humedad (psicrómetro) muestran que la incertidumbre en la medición de humedad es mas baja que la que podemos esperar con el sensor dual de fibra óptica, esto en base a los niveles de incertidumbre obtenidos en los experimentos de medición de temperatura. La posible causa de esta discrepancia es la deficiencia en la metodología que empleamos en el laboratorio para hacer las mediciones de humedad, en especial el control de la humedad. La metodología empleada fue

muy sencilla y adecuada para nuestros experimentos, sin embargo, para una investigación más profunda y una caracterización más detallada es necesario mejorar el control de la humedad en el ambiente en que se pretende medirla.

Literatura citada

- Born, M. y E. Wolf 1980. "Principles of optics". Pergamon Press.
- Buck, J. A. 1995. "Fundamentals of optical fibers". John Wiley and Sons, Inc.
- Burns, W. K. 1994. "Optical fiber rotation sensing". Academic Press, Inc.
- Fang, X. R. C. 1995. "Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a sagnac interferometer". *Opt. Lett.*, 20(20):2146-2148 p.
- Fraden, J. 1996. "Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications". Springer-Verlag, USA.
- Grattan, K. y B. Meggit 1995. "Optical fiber sensor technology". Chapman & Hall.
- Hocker, G. 1979. "Fiber-optic sensing of pressure and temperature". *Appl. Opt.*, 18(9):1445-1448 p.
- Huard, S. 1997. "Polarization of light". John Wiley and Sons, Inc.
- J. Tapia Mercado, A.V. Khomenko, A. G. W. 2001. "Precision and sensitivity optimization for white-light interferometric fiber-optic sensors". *Journal of Optical Technology*, 19(1):70-74 p.
- Jackson, D. 1985. "Monomode optical fibre interferometers for precision measurement". *J.Phys. Lett.*, 34:981-1001 p.
- Kaminow, I. y V. Ramaswamy 1979. "Single-polarization optical fibers: Slab model.". *Appl. Phys. Lett.*, 34(4):268-270 p.
- Mantynkien, T. y W. B. Urbanczyk 2000. "Spectral dependence of sensitivity of highly birefringent fibers to temperature, elongation and hydrostatic pressure.". *Optik*, 111(3):97-102 p.

- Noda, J., K. O. y Y. Sasaki 1986. "Polarization-maintaining fibers and their applications". *J. Lightwave Tech.*, 4(8):1071-1089 p.
- Poole, S. B. y D. N. Payne 1987. "Special optical fibers". SPIE, *Fiber Optics 1987: Fifth International Conference on Fiber Optics and opto-Electronics*, pp. 92-103.
- Portalgsm 2005. "Dispersión crómatica en fibras ópticas". <http://www.portalgsm.com>, http://www.portalgsm.com/documentacion_extendida/81_0_17_0_C/.
- R. Cortés, A. V. Khomenko, A. N. S. N. A. y L. A. Z. 1998. "Interferometric fiber-optic sensor with spiral polarization couplers". *Opt. Commun.*, 154:268-272 p.
- Rao, Y. y D. Jackson 1996. "Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry". *Meas. Sci. Technol.*, 7(7):981-999 p.
- Saleh, B. y M. Teich 1991. "Fundamentals of photonics". John Wiley & Sons, USA.
- Stolen, R. y R. D. Paula 1987. "Single-mode fiber components". *Procc. of IEEE*, 11:1498-1511 p.
- Tapia Mercado, J. C. 2001. "Sensores de fibra óptica basados en la interferometría de baja coherencia". Tesis de Maestría, CICESE, México.
- Ulrich, R. y M. Johnson 1979. "Fiber-ring interferometer: polarization analysis". *Optics Lett.*, 4(5):152-154 p.

Apéndice A

Programas de simulación y procesamiento de señales

A.1 Simulación de la señal de salida de un sensor de temperatura formado por lazo de Sagnac de fibra birrefringente

```
SIMULACION PARA UN LAZO
```

```
muestras=100; IO=60000; dNL=10;
```

```
pix=1024;
```

```
m=0.8; %distribucion de intensidad en el acoplador (no es exactamente 50/50)
```

```
j0=50; %numero de electrones por pixel en el ccd (aproximacion)
```

```
TH = 90; AP = 0; Bt = 0.5; dNL=dNL*10000; th=pi*TH/180;
```

```
ap=pi*AP/180; E1=[cos(ap);sin(ap)]; E2_t=[]; Ipin=[]; Ip=[];
```

```
LI=760; LF=1000;
```

```
LED=zeros(1,1024);
```

```
LED(112:912)=hanning(801);
```

```
pantalla=linspace(752,1008,1024);
```

```

lg=(1024*(LF-LI))/256;
long=linspace(LI,LF,lg);

for L=1:length(long),
    PHI = ((2*pi)*dNL)/(long(L));
    I2 = [1,0 ; 0,1];
    CR = (Bt^.5) * I2;
    CT = (i*(1-Bt)^.5) * I2;
    T = [exp(i*(PHI/2)),0;0,exp(-i*(PHI/2))];
    R1 = [cos(th),-sin(th) ; sin(th),cos(th)];
    R2 = [cos(-th),-sin(-th) ; sin(-th),cos(-th)];
    J2=(CR*R1*T*CR)+(CT*T*R2*CT);
    E2=J2*E1;
    I=abs(E2(1))^2+abs(E2(2))^2;
    Ip=[Ip,I];
    E2_t=[E2_t,E2];
end

Li=((LI-752)*1024)/256;
Lf=Li+lg;
rango_LED=LED(Li+1:Lf);

senal=I0*rango_LED.*(1+m*(2*Ip-1))+j0;
LED=LED*I0;
LED(Li+1:Lf)=senal;

sum=zeros(1,1024);
prom=zeros(1,1024);

```

```

for NN=1:muestras,
    NN
    ruido=[];
    noise=[];
    for npix=1:pix,
        r=poissrnd(LED(npix),1,1);
        noise=[noise,r-LED(npix)];
        ruido=[ruido,r];
    end
    sum=sum+noise;
    s=ruido';
    save ('C:\...\senales',num2str(NN),'.dat'],'s','-ascii');
end
prom=sum/muestras;
SNR=(LED.^2)/(prom.^2);

longitudes=linspace(LI,LF,1024);
save longitudes.dat longitudes -ascii;

```

A.2 Procesamiento de la señal de salida de un sensor de temperatura formado por lazo de Sagnac de fibra birrefringente

```

path='C:\...\programas\simulacion\señales'; nh=9; m0=1; SNR=1;
load longitudes.dat; longitudes=longitudes';

```

```

longitudes=longitudes(:,1); limI=250; limF=800; num=limF-limI;
c=1/4; SS=[]; archivos=dir(path);
[N,L]=size(archivos); files=[];

for f=3 : N,
    file = load ([path,'\',archivos(f).name]);
    files = [files, file(:,1)];
    clear file;
end

for f=1 : N-2,
    long = longitudes(limI:limF);
    %eliminamos los datos del inicio y del
    %final ya que no contienen informacion util
    DL=long(2)-long(1);
    signal=files(limI:limF,f);
    H=hanning(nh);
    %Se aplica una ventana Hanning para
    %suavizar debido al efecto del ruido
    signal=conv(H,signal);
    %Convolucion de la ventana Hanning con la matriz
    %que contiene la señal
    clear H;
    H=zeros(nh,1);
    %Al alterar el tamaño de signal debemos hacer lo
    %mismo para long, para mantener correspondencia de las
    %longitudes de onda con la señal
    X = (nh+1)/2; X = fix(X);

```

```

H(X)=1;
long=conv(H,long);
clear H;

signal=signal(2*nh:num-nh-1);
%eliminamos otra parte de la señal creado por
%efecto de la convolucion con la ventana hanning
long=long(2*nh:num-nh-1);

clear LM; clear Max; clear Lm; clear Min;
LM=[]; M=[]; Max=[]; Lm=[]; Min=[];
M=num-3*nh;
%M contiene el nuevo numero de elementos en los vectores

for n=1:M-2,
%Ciclo para encontrar los minimos en la señal. Lm contiene
%la posicion y Min el valor
    if signal(n)>signal(n+1),
        if signal(n+1)<signal(n+2),
            Lm=[Lm,(n+1)]; Min=[Min,signal(n+1)];
        else
            end
        else
            end
    end

end

for n=1:M-2,
%Ciclo para encontrar los maximos en la señal. LM contiene la

```

```

%posicion y Max el valor
    if signal(n)<signal(n+1),
        if signal(n+1)>signal(n+2),
            Max=[Max,signal(n+1)]; LM=[LM,(n+1)];
        else
            end
        else
            end
    end

end

m=1:num-3*nh;

%vector que tiene la nueva cantidad de elementos
RM=spline(LM,Max,m);

%suavizado de la linea que une los puntos maximos
Rm=spline(Lm,Min,m);

figure(3); subplot(211); plot(m,RM,m,Rm,m,signal); pause(0.5);

R=(RM+Rm)/2;

%Obtenemos el promedio de las envolventes.
%Esto nos da la ubicacion del espectro del led IR

R=R';

A=(RM-Rm)'/R;

%operaciones algebraicas que nos llevan a despejar de
%nuestra ecuacion el termino cosenoidal

signal=(signal./R-1);

signal=signal./A;

clear A; clear RM; clear Rm; clear R; clear LM; clear Lm;

clear Max; clear Min;

```

```
NN=size(signal); NN=NN(1);
%ubicacion de ceros de la señal.
ceros=[];
posignal=abs(signal);

for n=1:NN-2,
%ciclo para encontrar los ceros en nuestra señal.
    if posignal(n)>posignal(n+1),
        if posignal(n+1)<posignal(n+2),
            ceros=[ceros,(n+1)];
        else
            end
        else
            end
    end
end

M=size(ceros); M=M(2);
if signal(round((ceros(2)+ceros(3))/2))>0
%seleccionar la pendiente del inicio de la señal,
%si es positiva o negativa
    ini=2;
else
    ini=3;
end

if signal(round((ceros(M-1)+ceros(M-2))/2))<0
%seleccionar la pendiente del final de la señal,
%si es positiva o negativa
```

```

        fin=M-1;
else
        fin=M-2;
end

ciclos=0;
K=1./long;
%obtenemos las K, despreciando el termino de 2pi
M=(size(ceros(ini:fin))-1);
%Tomamos el nuevo rango con un numero par
%de ceros, para tener numero exacto de
%ciclos numero de ciclos totales
ciclos=M(2)/2;
puntos=500;
sig=signal(ceros(ini-1)+3:ceros(ini+1));
%hacemos un zoom al inicio para poder ubicar el cero real,
%el cual esta en el eje de las K
K1=K(ceros(ini-1)+3:ceros(ini+1));
%hacemos el mismo zoom para las K

KN=size(K1);  KN=KN(1);
KK1=K1(1):(K1(KN)-K1(1))/(KN*puntos):K1(KN);
sig=spline(K1,sig,KK1);
sig=abs(sig);
[M1,n]=min(sig);
kk1=KK1(n);

clear sig;

```

```

%Utilizamos el mismo procedimiento para el final de la señal
sig=signal(ceros(fin-1)+1:ceros(fin+1));
K2=K(ceros(fin-1)+1:ceros(fin+1));
KN=size(K2); KN=KN(1);
KK2=K2(1):(K2(KN)-K2(1))/(KN*puntos):K2(KN);
sig=spline(K2,sig,KK2);
sig=abs(sig);
[M2,n]=min(sig);
kk2=KK2(n);

S=(ciclos*kk1/(kk1-kk2)+c);
S=(S+1/4)/(kk1)/1000;
%Valor de la diferencia de camino optico correspondiente
%a la temperatura a la que se tomo la muestra
SS=[SS,S];
figure(3); subplot(212); plot(SS,'+'); pause(0.5);
end DCO=mean(SS) sigma=std(SS);

Ro=0.001; Rs=nh*DL; R=sqrt((Rs^2)+(Ro^2)); d1=(0.840^2)*exp(
[(pi*DCO*R) / (2*(0.840^2))]^2)/1e6 ); d1=d1*1e6; d1=d1/ [
((2*pi)^(5/4)) *m0*DCO*(sqrt(nh*SNR))] ;

```

A.3 Simulación de un sensor de humedad formado por dos lazos de Sagnac de fibra birrefringente

SIMULACION PARA DOS LAZOS INCLUYENDO EFECTOS DEL RUIDO Y ENVOLVENTE DEL

LED. ANULACION DE COMPONENTES PARASITAS EN EL ESPECTRO. AUN NO HAY PROCESAMIENTO DE LA SENAL.

```

IO=60000;          %Intensidad de la senal
dNL1=35*10000;    %longitud del primer lazo
dNL2=51*10000;    %longitud del segundo lazo
pix=1024;
m=0.8; %distribucion de intensidad en el acoplador
j0=50; %numero de electrones por pixel en el ccd
TH = 90; AP = 0; Bt = 0.5; th=pi*TH/180; ap=pi*AP/180;
E1=[cos(ap);sin(ap)]; E2_t=[]; Ipin=[]; Ip=[]; Ip_final=[];
LI=760; LF=980;

    LED=zeros(1,1024);
    LED(112:912)=hanning(801);
    pantalla=linspace(752,1008,1024);

    lg=(1024*(LF-LI))/256;
    long=linspace(LI,LF,lg);
    DL=long(2)-long(1);
    K=1./long*1000;
    N=size(K,2); dK=(max(K)-min(K))/N; KS=min(K):dK:max(K-dK);

    for L=1:length(long),
        PHI = ((2*pi)*dNL1)/(long(L));
        I2 = [1,0 ; 0,1];
        CR = (Bt^.5) * I2;
        CT = (i*(1-Bt)^.5) * I2;
        T = [exp(i*(PHI/2)),0;0,exp(-i*(PHI/2))];
    end

```

```

R1 = [cos(th),-sin(th) ; sin(th),cos(th)];
R2 = [cos(-th),-sin(-th) ; sin(-th),cos(-th)];
J2 =(CR*R1*T*CR)+(CT*T*R2*CT);
E2=J2*E1;
I=abs(E2(1))^2+abs(E2(2))^2;
Ip=[Ip,I];
E2_t=[E2_t,E2];
end

Li=((LI-752)*1024)/256;
Lf=Li+lg;
rango_LED=LED(Li+1:Lf);

senal1=I0*rango_LED.*(1+m*(2*Ip-1))+j0;
LED=LED*I0;
LED(Li+1:Lf)=senal1;    %LED contiene la senal 1

LED2=zeros(1,1024);
LED2(112:912)=hanning(801);

k=1;
for L=1:length(long),
    PHI = ((2*pi)*dNL2)/(long(L));
    I2 = [1,0 ; 0,1];
    CR = (Bt^.5) * I2;
    CT = (i*(1-Bt)^.5) * I2;
    T = [exp(i*(PHI/2)),0;0,exp(-i*(PHI/2))];
    R1 = [cos(th),-sin(th) ; sin(th),cos(th)];

```

```

R2 = [cos(-th),-sin(-th) ; sin(-th),cos(-th)];

J2 =(CR*R1*T*CR)+(CT*T*R2*CT);
E3=J2*E1;
I_final=abs(E3(1))^2+abs(E3(2))^2;
Ip_final=[Ip_final,I_final];
k=k+1;
end

Li=((LI-752)*1024)/256;
Lf=Li+lg;
rango_LED2=LED2(Li+1:Lf);

senal2=I0*rango_LED2.*(1+m*(2*Ip_final-1))+j0;
LED2=LED2*I0;
LED2(Li+1:Lf)=senal2;  %LED2 contiene senal 2

senal=LED.*LED2;
%producto de dos senales. Esta senal es la modulada final
save (['C:\...\senales',num2str(NN),'.dat'],'senal','-ascii');

%% etapa de adiccion de ruido
sum=zeros(1,1024);
prom=zeros(1,1024);
for NN=1:100;
    ruido=[];
    noise=[];
    for npix=1:pix,

```

```

        r=poissrnd(senal(npix),1,1);
        noise=[noise,r-senal(npix)];
        ruido=[ruido,r];
    end

    sum=sum+noise;

    s=ruido';

end

longitudes=linspace(LI,LF,1024);

save longitudes.dat longitudes -ascii;

```

A.4 Simulación de un sensor de humedad formado por dos lazos de Sagnac de fibra birrefringente

```

c=1/4; SS=[]; path='C:\Documents and Settings\Owner\MIs
documentos\CICESE\Tesis\programas\simulacion\señales'; nh=13;
limI=250; limF=700; num=limF-limI;

load longitudes.dat; longitudes=longitudes'; longitudes =
longitudes(:,1); c=1/4; SS=[]; archivos = dir(path); [N,L] =
size(archivos); files = [];

for f=3 : N,
    file = load ([path,'\',archivos(f).name]);
    file=file';
    files = [files, file(:,1)];
end

```

```
clear file;

end

for f=1 : N-2,

    long = longitudes(limI:limF);

    %eliminamos los datos del inicio y del
    %final ya que no contienen informacion util
    DL=long(2)-long(1);
    signal=files(limI:limF,f);
    H=hanning(nh);
    %Se aplica una ventana Hanning para suavizar
    %debido al efecto del ruido en la señal
    signal=conv(H,signal);
    %Convolucion de la ventana Hanning con la matriz
    %que contiene la señal
    figure(2); plot(signal); stop;pause(0.5);
    clear H;

    H=zeros(nh,1);
    X = (nh+1)/2; X = fix(X);
    H(X)=1;
    long=conv(H,long);
    clear H;

    signal=signal(2*nh:num-nh-1);
    %eliminamos otra parte de la señal creado por
    %efecto de la convolucion con la ventana hanning
    long=long(2*nh:num-nh-1);
```

```
clear LM; clear Max; clear Lm; clear Min;
LM=[]; M=[]; Max=[]; Lm=[]; Min=[];
M=num-3*nh;
%M contiene el nuevo numero de elementos en los vectores

for n=1:M-2,
%Ciclo para encontrar los minimos en la señal. Lm contiene
%la posicion y Min el valor
    if signal(n)>signal(n+1),
        if signal(n+1)<signal(n+2),
            Lm=[Lm,(n+1)]; Min=[Min,signal(n+1)];
        else
            end
        else
            end
    end
end

for n=1:M-2,
%Ciclo para encontrar los maximos en la señal. LM contiene
%la posicion y Max el valor
    if signal(n)<signal(n+1),
        if signal(n+1)>signal(n+2),
            Max=[Max,signal(n+1)]; LM=[LM,(n+1)];
        else
            end
        else
            end
    end
end
```

```

end

m=1:num-3*nh;

%vector que tiene la nueva cantidad de elementos de ambos vectores
RM=spline(LM,Max,m);

%suavizado de la linea que une los puntos maximos de la señal.
Rm=spline(Lm,Min,m);

figure(2); plot(long,RM,long,Rm,long,signal); pause(0.5);
R=(RM+Rm)/2;

%Obtenemos el promedio de las envolventes.
R=R';

A=(RM-Rm)'/R;

%operaciones algebraicas que nos llevan a despejar de nuestra
%ecuacion el termino cosenoidal
signal=(signal./R-1);
signal=signal./A;

clear A; clear RM; clear Rm; clear R; clear LM; clear Lm;
clear Max; clear Min;

NN=size(signal); NN=NN(1);

%ubicacion de ceros de la señal.
ceros=[];

posignal=abs(signal);

%la convertimos a una señal positiva

for n=1:NN-2,

%ciclo para encontrar los ceros en nuestra señal.
    if posignal(n)>posignal(n+1),

```

```

        if posignal(n+1)<posignal(n+2),
            ceros=[ceros,(n+1)];
        else
            end
        else
            end
    end

M=size(ceros); M=M(2);
if signal(round((ceros(2)+ceros(3))/2))>0
    %seleccionar la pendiente del inicio de la señal,
    %si es positiva o negativa
        ini=2;
    else
        ini=3;
    end

if signal(round((ceros(M-1)+ceros(M-2))/2))<0
    %seleccionar la pendiente del final de la señal,
    %si es positiva o negativa
        fin=M-1;
    else
        fin=M-2;
    end

ciclos=0;
K=1./long;
%obtenemos las K, numero de onda, despreciando el termino de 2pi

```

```

M=(size(ceros(ini:fin))-1);
%Tomamos el nuevo rango con un numero par de ceros,
%para tener numero exacto de ciclos
ciclos=M(2)/2;
%numero de ciclos totales
puntos=500;
sig=signal(ceros(ini-1)+3:ceros(ini+1));
%hacemos un zoom al inicio para poder ubicar el cero real,
%el cual esta en el eje de las K
K1=K(ceros(ini-1)+3:ceros(ini+1));
%hacemos el mismo zoom para las K

KN=size(K1); KN=KN(1);
KK1=K1(1):(K1(KN)-K1(1))/(KN*puntos):K1(KN);
sig=spline(K1,sig,KK1);
sig=abs(sig);
[M1,n]=min(sig);
kk1=KK1(n);

clear sig;
%Utilizamos el mismo procedimiento para el final de la señal
sig=signal(ceros(fin-1)+1:ceros(fin+1)-1);
K2=K(ceros(fin-1)+1:ceros(fin+1)-1);
KN=size(K2); KN=KN(1);
KK2=K2(1):(K2(KN)-K2(1))/(KN*puntos):K2(KN);
sig=spline(K2,sig,KK2);
sig=abs(sig);
[M2,n]=min(sig);

```

```

kk2=KK2(n);

S=round(ciclos*kk1/(kk1-kk2)+c);
S=(ciclos*kk1/(kk1-kk2)+c);
S=(S+1/4)/(kk1)/1000;
%Valor de la diferencia de camino optico correspondiente a la
%tempreatura a la que se tomo la muestra
SS=[SS,S];

end

if 0 Ro=0.001; Rs=nh*DL; R=sqrt((Rs^2)+(Ro^2));

d1=(0.840^2)*exp( [((DC0*R) / (2*(0.840^2)))^2]/1e6 ) ;
d1=d1*1e6; d1=d1/ [m0*DC0*(sqrt(nh*SNR))] ; end

```

