


TESIS DEFENDIDA POR

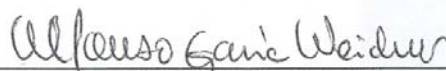
Josue Ernesto Castillo Aranda

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. Anatoli Khomenko

Director del Comité



Dr. Alfonso García Weidner

Miembro del Comité



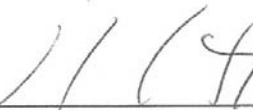
Dr. Serguei Miridonov

Miembro del Comité



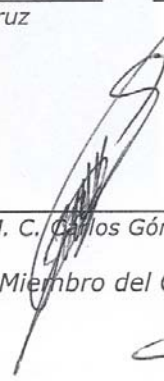
Dra. Diana Tentori Santacruz

Miembro del Comité



Dr. Modesto Ortiz Figueroa

Miembro del Comité



M. C. Carlos Gómez Agis

Miembro del Comité



Dr. Roger Rodney Bueno

Coordinador del programa de
posgrado en óptica.



Dr. David Hijario Covarrubias Rosales

Encargado del Despacho de la
Dirección de Estudios de Posgrado

6 de Mayo de 2008

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ÓPTICA**

**MULTIPLEXADO DE SENSORES BASADOS EN LA INTERFEROMETRIA DE BAJA
COHERENCIA**

TESIS

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

Presenta:

JOSUE ERNESTO CASTILLO ARANDA

Ensenada, Baja California, México, Mayo del 2008.

RESUMEN de la tesis de **Josue Ernesto Castillo Aranda**, presenta como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OPTICA con orientación en OPTOELECTRONICA. Ensenada, Baja california, Mayo de 2008.

MULTIPLEXADO DE SENSORES BASADOS EN LA INTERFEROMETRIA DE BAJA COHERENCIA

Resumen aprobado por:



Dr. Anatoli Khomenko Filatova
Director de Tesis

El presente trabajo de tesis comprende el desarrollo y estudio de una técnica de multiplexado de sensores basados en la interferometría de baja coherencia. Los sensores utilizados consisten en interferómetros de Sagnac de fibra óptica conectados en serie, lo cual nos permite hacer mediciones en diferentes puntos simultáneamente. El lazo de fibra óptica de cada interferómetro está formado por una fibra altamente birrefringente, la cual es utilizada como el elemento sensible del sensor. El método de adquisición de datos consiste en realizar un escaneo de longitudes de onda, haciendo uso del control por computadora de un láser sintonizable, un fotodetector y un sistema de adquisición de datos a la salida del sistema de sensores. El procesamiento digital de señales desarrollado en este trabajo de tesis, utilizado para interrogar a los sensores del sistema, se basa en procesamiento de señales en el dominio espectral.

Se logró experimentalmente el desarrollo y se investigó un sistema de multiplexado de sensores con cinco interferómetros de Sagnac. En base a los experimentos, se desarrolló un simulador numérico para un número arbitrario de sensores. Se observó una coincidencia entre señales experimentales y señales generadas numéricamente.

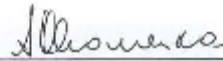
Se utilizó el simulador numérico para investigar cuáles son los principales factores que afectan en el número máximo de sensores como: potencia de láser, resolución de escaneo de longitud de onda, pérdidas de intensidad y coeficiente de acoplamiento de los acopladores de fibra óptica que forman los interferómetros de Sagnac. Se determinó una ecuación analítica para la señal de salida de un número arbitrario de sensores, la cual nos permitió calcular los parámetros óptimos para el sistema de sensores. Se encontró que para un número determinado de sensores, es necesario utilizar acopladores de fibra óptica con un coeficiente de acoplamiento determinado para lograr la mejor relación señal a ruido. Se estimó numéricamente, que el número máximo de sensores en serie es alrededor de 140 sensores. Este número muestra que el multiplexado de sensores reduce en gran medida el costo de los sensores interferométricos, lo cual los hacen convenientes para muchas aplicaciones.

Palabras clave: Sensores de fibra óptica, interferometría de baja coherencia, interferómetro de Sagnac, multiplexado de sensores.

ABSTRACT of the thesis presented by **Josue Ernesto Castillo Aranda**, as a partial requirement to obtain the SCIENCE MASTER degree in OPTICS with orientation in OPTOELECTRONIC. Ensenada, Baja California, May 2008.

**MULTIPLEXING OF LOW COHERENCE INTERFEROMETRIC
FIBER OPTIC SENSORS**

Abstract approved by:



Dr. Anatoli Khomenko Filatova
Thesis Director

This thesis work comprises the development and study of multiplexed fiber optic sensor based on a low coherence interferometry. The sensor consists in the fiber optic Sagnac interferometers connected in series, which allows measuring in many different points simultaneously. Each interferometer is a high birefringence fiber optic coil that acts as the sensitive element of the sensor. The data acquisition method consist on wavelength scanning using computer controlled tunable semiconductor laser and photodetector on the output of the multiplexed sensor. The digital signal processing developed in present work of thesis, which allows the interrogation of each individual sensor of the multiplexed system, is based on the frequency filtering of the output signal.

The multiplexed sensor with five Sagnac interferometers has been developed and investigated experimentally. A numerical simulator has been developed for a multiplexed sensor with arbitrary number of sensing points. A coincidence was shown between the signals generated by the numeric simulator and the signals recorded in the experiments.

The simulator was used to investigate how the maximum number of the sensors in multiplexed system depends on main system parameters, such as the laser power, spectral resolution of wavelength scanning, intensity losses and coupling coefficient of the fiber optic coupler used in the Sagnac interferometers. Analytical equations for output signal has been determined for arbitrary number of Sagnac interferometers that allows calculating the optimal parameters of the sensor system. In particular it was shown that each number of the sensors requires the fiber optic couplers with the certain coupling coefficient to reach the best output signal-to-noise ration. The maximum number of the sensors connected in series was estimated as 140. This number shows that the multiplexing should greatly reduce the cost of fiber optic interferometric sensors making them suitable for many applications.

Keywords: Fiber optic sensors, low coherence interferometry, Sagnac interferometer, fiber optic sensors multiplexing.

DEDICADO A:

A mis padres:

Socorro y Adán

A mi futura esposa:

Patricia

A mis hermanas:

Marysol y Coral

Agradecimientos

Al *Dr. Anatoli Khomenko Filatova*, por su apoyo y orientación en la realización de este trabajo de tesis. Por su paciencia y todos los conocimientos brindados. Es un placer conocerlo y trabajar con usted.

Deseo expresar mi gratitud a los miembros del comité de tesis: *Dra. Diana Tentori, Dr. Alfonso García, Dr. Serguei Miridonov, Dr. Modesto Ortiz, M. C. Carlos Gómez*: por sus críticas, ideas y aportaciones en el desarrollo de este trabajo de tesis.

A *Marco García*, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de generación: *Felipe, Ernesto, David, Pedro, Fernando, Héctor, Raúl, Gabriela*; por su apoyo y compañerismo.

A mi camarada Felipe, por su compañerismo en estudio y fiestas por igual.

Al *Dr. Pedro Negrete*, por su apoyo en mis primeros días en CICESE.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme el apoyo económico durante la realización de mis estudios de maestría.

Finalmente, a mi novia *Patricia* por mis arengas de. No puedo! tengo que terminar la tesis. Por su apoyo, paciencia, cariño y comprensión. Eternamente agradecido.

Contenido.

CAPÍTULO I.	1
INTRODUCCIÓN.	1
I.1. INTRODUCCIÓN.	1
I.2. METAS Y OBJETIVOS.	3
I.2.1. Objetivo principal.	3
I.2.2. Objetivos.....	4
CAPÍTULO II.	5
TEORÍA.	5
II.1. INTRODUCCIÓN.....	5
II.2. PRINCIPIO DE TRANSMISIÓN DE LA LUZ EN FIBRAS ÓPTICAS.....	5
II.3. BIRREFRINGENCIA.....	7
II.3.1. Birrefringencia inducida por tensión elástica.....	8
II.3.2. Fibras birrefringentes.....	9
II.4. ESTRUCTURA DE UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA.....	11
II.5. CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....	12
II.6. SENSORES INTERFEROMÉTRICOS.....	13
II.7. INTERFEROMETRÍA DE BAJA COHERENCIA.....	14
II.7.1. Procesamiento en el dominio de la fase.....	16
II.7.2. Procesamiento en el dominio espectral.....	17
II.8. TÉCNICAS DE MULTIPLEXADO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....	20
II.8.1. Multiplexado por coherencia.....	22
II.8.2. Multiplexado por división de frecuencia.....	22
II.8.3. Combinado de Multiplexado por coherencia y división de frecuencia.....	24
CONCLUSIONES.	26
CAPÍTULO III.	27
EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC.	27
INTRODUCCIÓN.....	27
III.1. EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC.....	27
III.2. EL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA BIRREFRINGENTE.....	28
III.3. APLICACIONES DEL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC.....	36
CONCLUSIONES.	38

Contenido (Continuación).

CAPÍTULO IV	39
EXPERIMENTOS	39
INTRODUCCIÓN.....	39
IV.1. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTOS.....	39
IV.2. EXPERIMENTO CON UN INTERFERÓMETRO DE SAGNAC.....	42
IV.2.1 Procesado de señales.....	44
IV.2.2. Resultados experimentales.....	50
IV.3. EXPERIMENTO CON DOS INTERFERÓMETROS DE SAGNAC.....	53
IV.3.1 PROCESADO DE SEÑALES.....	58
IV.3.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	59
IV.4. EXPERIMENTO CON TRES INTERFERÓMETROS DE SAGNAC.....	63
IV.4.1 Procesado de señales.....	66
IV.4.2. Resultados experimentales.....	71
IV.5. EXPERIMENTO CON CINCO INTERFERÓMETROS DE SAGNAC.....	74
IV.5.1. Resultados experimentales.....	79
CONCLUSIONES	83
CAPÍTULO V	84
PROGRAMAS DE SIMULACIÓN	84
INTRODUCCIÓN.....	84
V.1. LÍMITE TEÓRICO DE NÚMERO DE SENSORES.....	84
V.2. PROGRAMA DE DISEÑO DE SISTEMA DE.....	91
V.3. SIMULADOR NUMÉRICO.....	95
CONCLUSIONES	106
Capítulo VI	108
CONCLUSIONES	108
LITERATURA CITADA	110

Listado de Figuras.

Figura.

Pag.

1.	REFLEXIÓN TOTAL INTERNA DENTRO DE UNA FIBRA ÓPTICA EN DONDE ($n_1 > n_2$).....	6
2.	LOS TRES PRINCIPALES TIPOS DE FIBRA ÓPTICA Y SUS PERFILES DE ÍNDICE. A) FIBRA MULTIMODAL DE ÍNDICE ESCALONADO, B) FIBRA MULTIMODAL DE ÍNDICE GRADUADO, C) FIBRA MONO MODAL DE ÍNDICE ESCALONADO.....	6
3.	MODELO DE OSCILADOR MECÁNICO PARA UN MEDIO ISÓTROPICO. TODOS LOS RESORTES SON IGUALES Y LA OSCILACIÓN PUEDE VIBRAR IGUAL EN TODAS DIRECCIONES.	8
4.	MODELO DE OSCILADOR MECÁNICO PARA UN MEDIO ANISÓTROPICO. LOS RESORTES NO SON IGUALES Y LA OSCILACIÓN NO VIBRARA IGUAL EN TODAS DIRECCIONES.....	8
5.	TIPOS DE FIBRAS BIRREFRINGENTES. A) FIBRA MONOMODO CON NÚCLEO ELÍPTICO,B)FIBRA MONOMODO CON REVESTIMIENTO ELÍPTICO, BIRREFRINGENCIA INDUCIDA POR TENSIÓN, C) FIBRA TIPO CORBATA DE MONO, BIRREFRINGENCIA INDUCIDA POR TENSIÓN, D) FIBRA TIPO PANDA, BIRREFRINGENCIA INDUCIDA POR TENSIÓN.	10
6.	ESQUEMA DE UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA.....	11
7.	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS DOS GRUPOS DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA. A) SENSOR EXTRÍNSECO; B) SENSOR INTRÍNSECO.	12
8.	ARREGLOS INTERFEROMÉTRICOS DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA. A) FABRY-PEROT; B) MICHELSON; C) MACH-ZENDER; D) SAGNAC.....	14
9.	ESQUEMA BÁSICO DE SENSOR INTERFEROMÉTRICO DE BAJA COHERENCIA.....	15
10.	ESQUEMA DE SENSOR DE ANILLO: DC = ACOPLADOR DIRECCIONAL; PZT.....	21
11.	ESQUEMA DE MULTIPLEXADO POR COHERENCIA. SP=PROCESAMIENTO DE SEÑAL.....	22
12.	ESQUEMA DE MULTIPLEXADO POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA.	23
13.	ESQUEMA EN PARALELO DE MULTIPLEXADO POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA INTERROGADO POR SINTONIZADO COHERENTE MEDIANTE UN INTERFERÓMETRO RECEPTOR.	24
14.	ARREGLO DE SENSORES COMBINANDO MULTIPLEXADO POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA Y MULTIPLEXADO POR DIVISIÓN DE COHERENCIA.	25
15.	ESQUEMA DE TRAYECTORIAS QUE RECORRE LA LUZ EN UN INTERFERÓMETRO TIPO SAGNAC.	28
16.	TRANSMITANCIA DE ACOPLADOR DIRECCIONAL.....	30
17.	ESQUEMA DE EJES REQUERIDO PARA EXPRESAR EL LAZO DE FIBRA BIRREFRINGENTE SIN TORSIÓN.....	32

Listado de Figuras (continuación).

Figura.	Pag.
18. ESQUEMA DE EJES REQUERIDO PARA EXPRESAR EL LAZO DE FIBRA BIRREFRINGENTE TORCIDA CON UN ÁNGULO $\pi/2$	33
19. DIAGRAMA DE BLOQUES QUE DESCRIBE AL INTERFERÓMETRO DE SAGNAC DE FIBRA ÓPTICA.	34
20. SENSOR INTERFEROMÉTRICO UTILIZANDO LÁSER SINTONIZABLE.	41
21. ESQUEMA DE MULTIPLEXADO EN SERIE.....	41
22. ARREGLO EXPERIMENTAL CON UN INTERFERÓMETRO.	42
23. SEÑAL DE SALIDA DE ARREGLO EXPERIMENTAL.	43
24. ESQUEMA DE PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES.	44
25. SEÑAL DE ARREGLO EXPERIMENTAL CONVERTIDA A VECTOR DE ONDA k	46
26. ESPECTRO DE FOURIER DE SEÑAL.	48
27. ESPECTRO DE FOURIER FILTRADO.....	50
28. DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO (ΔnL) A TEMPERATURA AMBIENTE $20^{\circ}C$	50
29. BRINCOS EN CÁLCULO DE DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO ΔnL	51
30. EXPERIMENTO CON TEMPERATURA. A) ΔnL TEMPERATURA APLICADA A INTERFERÓMETRO. B) ΔnL PRODUCIDO POR CAMBIOS DE TEMPERATURA.....	51
31. BRINCOS EN CÁLCULO DE DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO ΔnL	52
32. ARREGLO EXPERIMENTAL CON DOS INTERFERÓMETROS.	54
33. ESQUEMA DE FLUJO DE SEÑALES.	54
34. ESQUEMA DE FLUJO DE SEÑALES DE ARREGLO EXPERIMENTAL CON UN CIRCULADOR COLOCADO ENTRE DOS INTERFERÓMETROS.....	56
35. A) SEÑAL DE SALIDA SERIE DE ARREGLO EXPERIMENTAL. B) SEÑAL DE SALIDA CIRCULADOR DE ARREGLO EXPERIMENTAL.	56
36. ESPECTRO DE FOURIER DE DOS SENSORES EN SERIE DE LONGITUDES DE 2 Y 6 METROS. A) SIN CIRCULADOR ENTRE LOS SENSORES. B) CON CIRCULADOR ENTRE LOS SENSORES.....	57
37. FILTRADO ESPECTRAL DE COMPONENTES FUNDAMENTALES DE SENSORES.	60
38. A) ΔnL DE INTERFERÓMETRO DE 2.1M A $22^{\circ}C$ B) ΔnL DE INTERFERÓMETRO DE 6.3M. C) RAZÓN ENTRE INTERFERÓMETROS. D) TEMPERATURA APLICADA A INTERFERÓMETRO DE 6.3M.....	60
39. DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO A TEMPERATURA AMBIENTE DE: A) INTERFERÓMETRO DE 2.1M, MUESTREO DE 1KS/S. B) INTERFERÓMETRO DE 6.3M, MUESTREO DE 1KS/S. C) INTERFERÓMETRO DE 2.1M, MUESTREO DE 5KS/S. D) INTERFERÓMETRO DE 6.3M, MUESTREO DE 5KS/S.....	61

Listado de Figuras (Continuación).

Figura.	Pag.
40. ARREGLO EXPERIMENTAL CON TRES INTERFERÓMETROS.	65
41. ESQUEMA DE FLUJO DE SEÑALES DE ARREGLO EXPERIMENTAL.	65
42. SEÑAL DE SALIDA DE ARREGLO EXPERIMENTAL.	66
43. ESPECTRO DE SEÑAL EXPERIMENTAL.	69
44. ESPECTRO DE FOURIER DE LOGARITMO DE SEÑAL.	70
45. A) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE REFERENCIA. B) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE 8M. C) TEMPERATURA APLICADA A SENSOR DE 8M. D) RAZÓN ENTRE INTERFERÓMETROS.	72
46. A) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE REFERENCIA (6M). B) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE 10M. C) TEMPERATURA APLICADA A SENSOR DE 10M. D) RAZÓN ENTRE INTERFERÓMETROS.	73
47. ARREGLO EXPERIMENTAL CON CINCO INTERFERÓMETROS.	77
48. SEÑAL DE SALIDA DE ARREGLO EXPERIMENTAL.	78
49. A) ESPECTRO DE FOURIER DE SEÑAL. B) ESPECTRO DE FOURIER DE LOGARITMO DE SEÑAL.	78
50. DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE REFERENCIA.	79
51. A) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE 8M. B) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE 10M. C) RAZÓN ENTRE SENSOR DE 8M Y SENSOR DE REFERENCIA (6M). D) RAZÓN ENTRE SENSOR DE 10M Y SENSOR DE REFERENCIA (6M).	80
52. DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE REFERENCIA.	81
53. A) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE 7M. B) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO DE SENSOR DE 9M. C) RAZÓN ENTRE SENSOR DE 7M Y SENSOR DE REFERENCIA. D) RAZÓN ENTRE SENSOR DE 9M Y SENSOR DE REFERENCIA.	82
54. SNR PARA DIFERENTE NÚMERO DE SENSORES. A) PARA UN SISTEMA SIN PÉRDIDAS $\alpha_p = (1)$. B) PARA UN SISTEMA REAL CON PÉRDIDAS $\alpha_p = (0.85)$	88
55. A) NÚMERO DE SENSORES PARA DIFERENTES POTENCIAS, CON $\alpha = 0.1$ Y $\Delta f = 4Hz$ POR SENSOR. B) NÚMERO DE SENSORES PARA DIFERENTES RESOLUCIONES DE SISTEMA CON $\Delta f = 4Hz$ POR SENSOR.	89
56. A) SNR PARA 1 SENSOR, B) SNR PARA 5 SENSORES, C) SNR PARA 10 SENSORES D) SNR PARA 50 SENSORES.	90
57. ALGORITMO DE PROGRAMA DE DISEÑO.	93
58. A) NÚMERO DE SENSORES CON RANGO DINÁMICO DE $100^{\circ}C$. B) NÚMERO DE SENSORES CON RANGO DINÁMICO DE $10^{\circ}C$	94
59. ALGORITMO DE SIMULADOR.	96

Listado de Figuras (Continuación).

Figura.	Pag.
60. A) SEÑAL DE SIMULADOR NUMÉRICO. B) SEÑAL DE ARREGLO EXPERIMENTAL.	97
61. ESPECTRO DE SEÑAL EXPERIMENTAL Y ESPECTRO DE SEÑAL DE SIMULADOR NUMÉRICO.	97
62. TEMPERATURA APLICADA A SENSOR DE 6M.	98
63. A) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO ΔnL DE SENSOR DE 6M. B) DIFERENCIA DE CAMINO ÓPTICO ΔnL DE SENSOR SIMULADO NUMÉRICAMENTE.	98
64. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SEÑAL Y ESPECTRO DE FOURIER, PARA UN SENSORES CON ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA CON. A) $\alpha = 0.5$ B) $\alpha = 0.01$	99
65. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SEÑAL Y ESPECTRO DE FOURIER, PARA DOS SENSORES CON ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA CON. A) $\alpha = 0.5$ B) $\alpha = 0.01$	100
66. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SEÑAL Y ESPECTRO DE FOURIER, PARA TRES SENSORES CON ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA CON. A) $\alpha = 0.5$ B) $\alpha = 0.01$	101
67. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SEÑAL Y ESPECTRO DE FOURIER, PARA CINCO SENSORES CON ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA CON. A) $\alpha = 0.5$ B) $\alpha = 0.01$	103
68. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SEÑAL Y ESPECTRO DE FOURIER, PARA VEINTE SENSORES CON ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA CON. A) $\alpha = 0.5$ B) $\alpha = 0.01$	104
69. A) NÚMERO DE SENSORES CON RANGO DINÁMICO DE 100°C . B) NÚMERO DE SENSORES CON RANGO DINÁMICO DE 10°C . DONDE EL NÚMERO MÍNIMO DE PERIODOS ES $N_{p\min} = P_{e1} + 10$	105
70. ESPECTRO DE FOURIER DE SEÑAL DE SIMULADOR NUMÉRICO PARA: A) UN SISTEMA DE SENSORES FORMADOS POR ACOPLADORES DE FIBRA CON $\alpha = 0.5$. B) UN SISTEMA DE SENSORES FORMADOS POR ACOPLADORES DE FIBRA CON $\alpha = 0.01$	106

Capítulo I

Introducción

I.1. Introducción

Un sensor se puede definir como un instrumento que recibe una señal o un estímulo externo y responde con una señal eléctrica (Fraden, Jacob, 1996.). Estímulo es el parámetro, propiedad o condición que es detectada y convertida a una señal eléctrica.

El mundo de los sensores de fibra óptica se encuentra en la intersección de las telecomunicaciones por fibra óptica, optoelectrónica y metrología.

El propósito de un sensor es responder a algún tipo de propiedad física y convertir está en una señal eléctrica compatible con los instrumentos electrónicos para su procesado (Tapia Mercado, 2001). La mayoría de las ventajas de los sensores de fibra óptica parten del hecho de que las fibras son fabricadas de material dieléctrico y que el flujo de partículas usado para transmitir la señal está formado por fotones y no de electrones. Aunque los sistemas basados en fotodetectores semiconductores y en fuentes de diodos láser son más pequeños y más ligeros que los sistemas tradicionales, la ventaja más significativa de los sensores de fibra óptica es la inmunidad del flujo de fotones a la interferencia electromagnética (Advanced Technology Transfer Project Bi-National Consortium, 2004.), su aislamiento eléctrico, pequeño tamaño, poco peso, flexibilidad, alta sensibilidad, posibilidad de realizar detección distribuida en tiempo real y su compatibilidad con los sistemas de telemetría de fibra óptica .

Los sensores de fibra óptica pueden ser colocados cerca de grandes fuentes de interferencia electromagnética, tales como motores, generadores de alta potencia, fuentes de poder de alto voltaje, entre otros sin ser afectados en la medición.

Los sensores interferométricos son conocidos por su alta sensibilidad la cual se basa en diferentes tipos de interferómetros como son: Sagnac, Mach-Zender, por citar algunos ejemplos.

Entre los sensores interferométricos se encuentran los sensores basados en el método conocido como interferometría de baja coherencia, lo que significa que se utiliza una fuente óptica con un ancho espectral considerablemente grande.

Una característica primordial de los sensores basados en la interferometría de baja coherencia es que la exactitud de la medición es virtualmente 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. Además estos sensores tienen una alta sensibilidad y rango dinámico mucho mayor que los sensores interferométricos que utilizan luz coherente.

Una desventaja enorme que presentan los sensores de fibra óptica basados en la interferometría de baja coherencia es el costo de los mismos. Debido a esto se pretende desarrollar una técnica de multiplexado de sensores interferométricos con la finalidad de bajar el costo de los sistemas que utilicen sensores de fibra óptica de este tipo.

En la tabla I, se da una lista de las principales ventajas y desventajas que ofrecen los sensores de fibra óptica respecto a los sensores convencionales (Tapia Mercado, 2001).

Tabla I. Ventajas y desventajas de los sensores de fibra óptica.

ventajas	Desventajas
Seguridad	Fragilidad
Menor peso	Sensibilidad a múltiples parámetros ambientales
Inmunidad a interferencia electromagnética	costo
Gran ancho de banda	
Menor tamaño	
Alta sensibilidad	
Pasivo (totalmente dieléctrico)	
Multiplexado	

I.2. Metas y Objetivos

En un estudio de mercado realizado por estudiantes de la Universidad de Arizona menciona que para poder entrar al mercado de una manera competitiva es necesario bajar el costo del sistema de sensores, para esto es necesario tener la capacidad de poder multiplexar más de 100 sensores por unidad procesadora (Advanced Technology Transfer Project Bi-National Consortium, 2004). Por esta razón en este trabajo de tesis se pretende diseñar las herramientas de procesamiento de datos y diseño de sistemas de multiplexado de sensores para plantar las bases para futuros proyectos.

I.2.1. Objetivo principal

Realizar un estudio experimental y teórico para analizar la posibilidad de desarrollar un método de multiplexado de sensores interferométricos tipo Sagnac basados en la técnica de baja coherencia, con la finalidad de proponer los métodos para reducir el costo de este tipo de sistemas.

I.2.2. Objetivos

Con el fin de satisfacer la meta propuesta se presentan los siguientes objetivos de este proyecto de tesis:

- 1) Construir un sistema de sensores interferométricos tipo Sagnac basado en la interferometría de baja coherencia.
- 2) Desarrollar los métodos numéricos y programas de cómputo correspondientes para el procesamiento de las señales del sensor en el dominio espectral.
- 3) Investigar las características del sensor multiplexado con diferente número de sensores.
- 4) Con base en los resultados experimentales, desarrollar un simulador numérico de las señales de salida de un sensor interferométrico tipo Sagnac basado en interferometría de baja coherencia.
- 5) Investigar numéricamente como depende las características del sistema de los parámetros de sus componentes y del número de sensores agregados.

Capítulo II

Teoría

II.1.Introducción

En este capítulo nos enfocaremos en algunos conceptos básicos de fibras ópticas, sensores de fibra óptica y sus clasificaciones, tipo de procesado de señales y algunos tipos de multiplexado de sensores que se han desarrollado en el ámbito científico.

II.2. Principio de transmisión de la luz en fibras ópticas

El concepto de conducir la luz dentro de un dieléctrico estrecho y largo, mediante reflexión total interna, se conoce desde hace bastante tiempo. John Tyndall (1870) demostró que una fina corriente de agua podía contener y guiar la luz.

Una fibra óptica es una hebra de material dieléctrico de baja absorción óptica que permite atrapar la radiación óptica y guiarla. Típicamente, una fibra óptica consiste de por lo menos dos materiales ópticos con diferente índice de refracción. El material con índice de refracción más alto forma el núcleo de la fibra y es por donde se propaga la mayor cantidad de radiación óptica. El material con menor índice de refracción forma la cubierta la cual rodea completamente al núcleo. La luz es atrapada en la fibra óptica debido al fenómeno de reflexión total interna, el cual ocurre en la frontera entre el núcleo y la cubierta. 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:

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

donde n_2 y n_1 son los índices de refracción del núcleo y de la cubierta, respectivamente, como se indica en la figura 1.

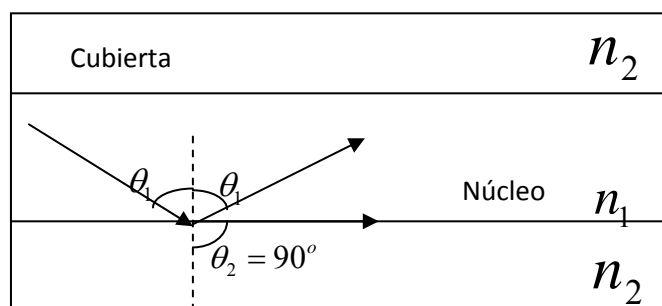


Figura 1 Reflexión total interna dentro una fibra óptica en donde ($n_1 > n_2$).

Existen varios tipos de fibras ópticas, de los cuales los tipos más comunes se muestran en la figura 2.

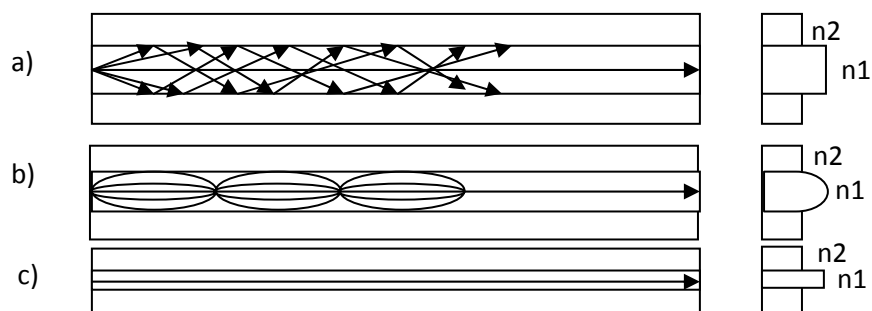


Figura 2. Los tres principales tipos de fibra óptica y sus perfiles de índice. a) Fibra multimodal de índice escalonado, b) Fibra multimodal de índice graduado, c) Fibra monomodal de índice escalonado.

II.3. Birrefringencia

Muchas sustancias cristalinas, es decir, sustancias cuyos átomos están dispuestos según alguna clase de serie repetitiva regular, son ópticamente anisótropas. Sus propiedades ópticas no son las mismas en todas direcciones dentro de una muestra dada. En la figura 3 se representa el oscilador isótropo usando el modelo mecánico de una capa esférica cargada, atada a resortes idénticos en un punto fijo. Se trata de una representación adecuada para las sustancias ópticamente isotrópicas. Los sólidos amorfos como el vidrio y el plástico son, por lo general aunque no siempre, isótropos. La figura 4 muestra otra capa cargada, esta vez por resortes de diferente rigidez, es decir con diferentes constantes de elasticidad. Un electrón que se desplaza del equilibrio a lo largo de una dirección paralela a una serie de “resortes” evidentemente oscilará con una frecuencia característica distinta a la procedente de un desplazamiento hacia otra dirección.

Como sabemos, la luz se propaga a través de un medio transparente por excitación de los átomos dentro del medio. Los electrones son impulsados por el campo eléctrico E y reradian. Estas ondas secundarias se recombinan y la onda refractada resultante avanza. La velocidad y por consiguiente, el índice de refracción están determinados por la diferencia entre la frecuencia del campo E la frecuencia natural o característica de los átomos. Una anisotropía en la fuerza de enlace se manifestará, por lo tanto, en una anisotropía en el índice de refracción. Por ejemplo si la luz con un estado de polarización P , se moviera a través de algún cristal hipotético encontrándose con unos electrones que pudieran ser representados por la figura 4, su velocidad estaría gobernada por la orientación de E . Si éste fuera paralelo a los resortes rígidos o en una dirección de enlace fuertes a lo largo del eje x , la frecuencia natural del electrón sería alta. Por el contrario si E se propaga paralelo al eje y , donde la fuerza de enlace es más débil, la frecuencia natural sería más baja. Un material con índice de refracción dependiente del estado de polarización de la luz es birrefringente (Hecht, 2000).

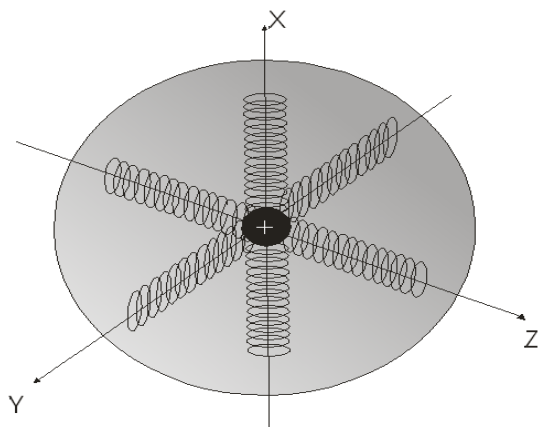


Figura 3. Modelo de oscilador mecánico para un medio isotrópico. Todos los resortes son iguales y la oscilación puede vibrar igual en todas direcciones.

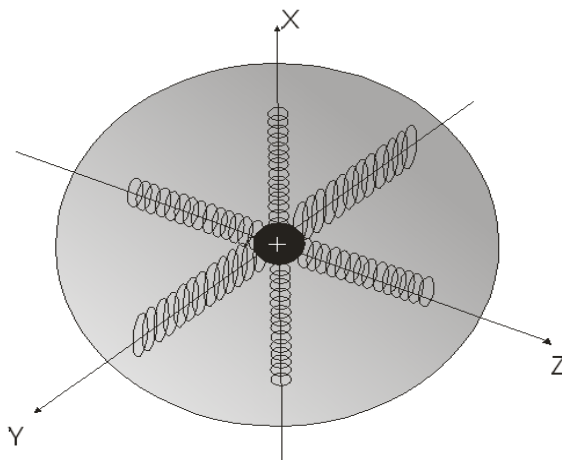


Figura 4. Modelo de oscilador mecánico para un medio anisótropo. Los resortes no son iguales y la oscilación no vibrará igual en todas direcciones.

II.3.1. Birrefringencia inducida por tensión elástica

En 1816 Sir David Brewster descubrió que se podía convertir las sustancias transparentes normalmente isotrópicas en ópticamente anisótropas aplicando un esfuerzo mecánico; este fenómeno se denomina birrefringencia mecánica, fotoelasticidad, o birrefringencia de tensión. Bajo compresión o tensión el material adquiere la propiedad de

birrefringencia. En materiales birrefringentes el eje óptico se encuentra en la dirección del esfuerzo mientras que la birrefringencia inducida es proporcional al esfuerzo mismo.

II.3.2.Fibras birrefringentes

La birrefringencia en una fibra óptica monomodo puede ser introducida ya sea por la elipticidad del núcleo, birrefringencia geométrica, o por la aplicación de elementos de tensión localizados paralelamente a lo largo del núcleo figura 5.

Las perturbaciones externas tales como las curvaturas y torsión generan variaciones en el estado de polarización de la luz guiada por fibras ópticas monomodo ordinarias. Las fibras altamente birrefringentes superan esta dificultad mediante la introducción de niveles de birrefringencia intrínseca en exceso, comparadas con aquellas producidas por factores externos, dejando el estado de polarización inmune a la mayoría de las perturbaciones. Es decir, la luz que es introducida a la fibra con polarización lineal paralela a uno de los ejes de la fibra permanecerá polarizada paralela a este eje, aún cuando la fibra sea curvada ligeramente, torcida, o expuesta a campos magnéticos o eléctricos. Estas fibras altamente birrefringentes son llamadas fibras que preservan la polarización. Las fibras de este tipo son frecuentemente utilizadas como elemento activo en los sensores interferométricos de fibra óptica. Tales fibras son caracterizadas por su birrefringencia modal B :

$$B = \Delta n = n_x - n_y = \frac{\lambda}{2\pi} (\beta_x - \beta_y); \quad (2)$$

donde n_x y n_y son los índices efectivos de refracción de los modos polarizados a lo largo de los ejes principales x y y de la fibra respectivamente, $\beta_x - \beta_y$ es la diferencia en la constante de propagación de los modos con polarización ortogonales entre sí. La magnitud de la birrefringencia interna está caracterizada generalmente por la longitud de batido L_b de los dos modos de polarización:

$$L_b = \frac{\lambda}{\Delta n} = \frac{2\pi}{\beta_x - \beta_y} = \frac{\lambda}{B}. \quad (3)$$

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.

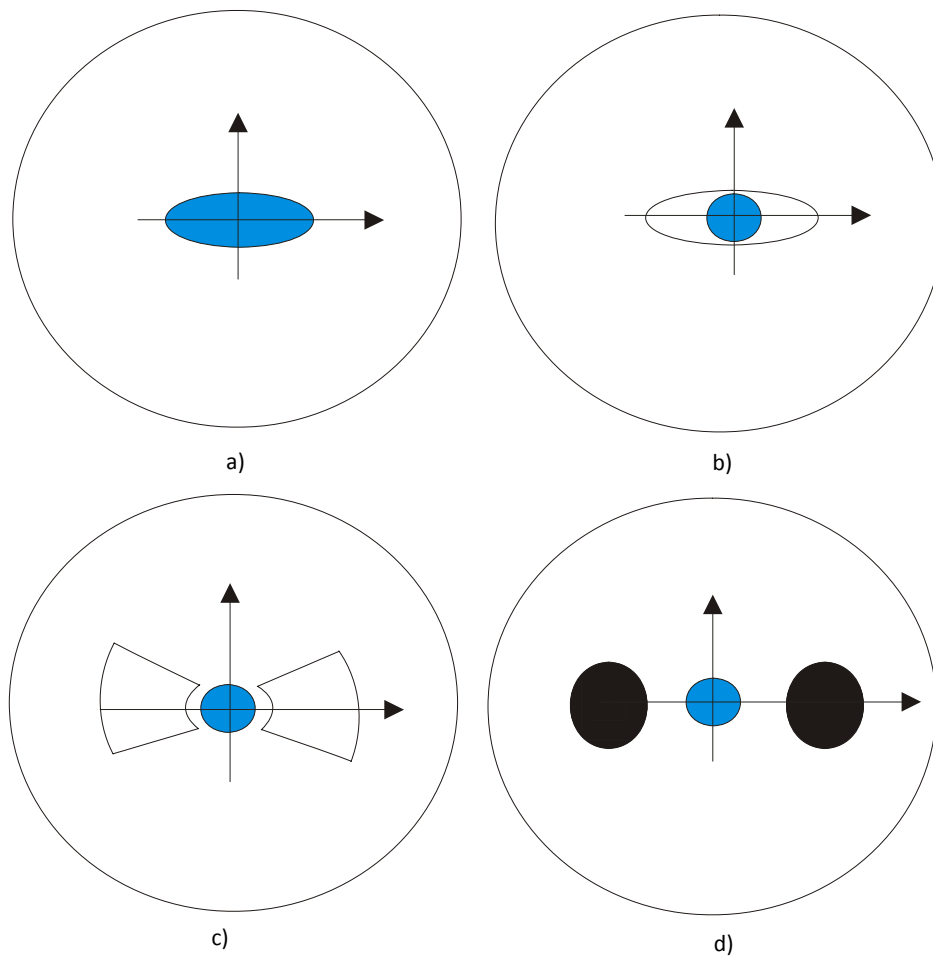


Figura 5. Tipos de fibras birrefringentes. a) Fibra monomodo con núcleo elíptico, b) Fibra monomodo con revestimiento elíptico, birrefringencia inducida por tensión, c) Fibra tipo corbata de moño, birrefringencia inducida por tensión, d) Fibra tipo panda, birrefringencia inducida por tensión.

II.4. Estructura de un sensor de fibra óptica

El concepto básico de un sensor de fibra óptica se muestra en la figura 6. La luz emitida de una fuente es acoplada mediante una interfase óptica a una fibra óptica la cual tiene la función de transmitir la luz a un modulador. Los moduladores desempeñan una variedad de funciones, como son, modulación de amplitud, fase, frecuencia y polarización de la luz. Los cuales responden a una perturbación física a medir. Después de su paso por el modulador la luz es guiada por otra fibra a un sistema de detección de señal, para convertir nuestra señal óptica en señal eléctrica que pueda ser procesada, grabada o exhibida para su observación.

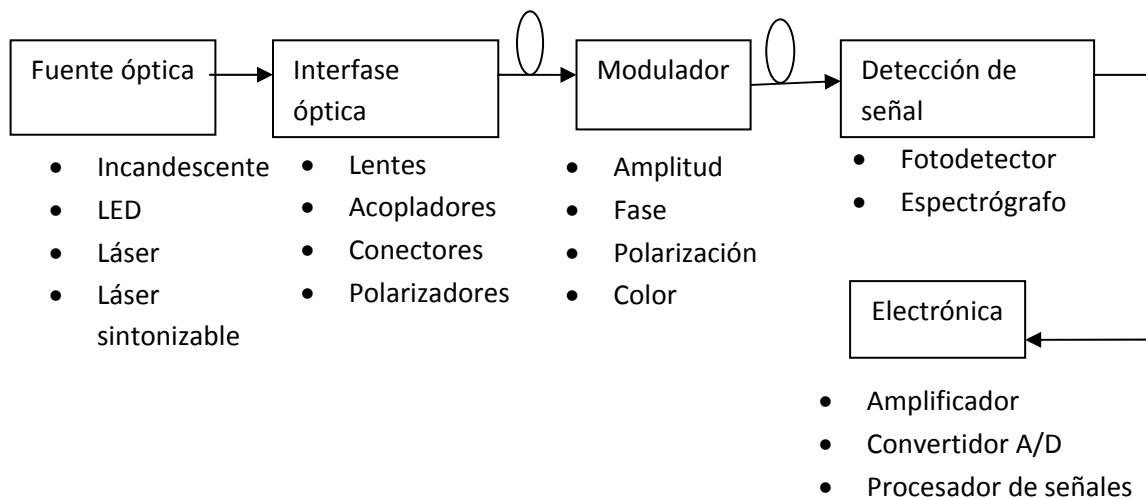


Figura 6. Esquema de un sensor de fibra óptica.

II.5. Clasificación de los sensores de fibra óptica.

Debido a la riqueza de sensores que se tiene, es importante clasificarlos ya sea por lo que miden, por el campo de aplicación o por el mecanismo de modulación (Chai 1990). Los sensores serán divididos en dos grupos, dependiendo si la modulación de la luz es implementada dentro o fuera de la fibra (figura 7): los sensores de fibra óptica pueden ser clasificados como intrínsecos o extrínsecos. Los sensores intrínsecos son aquellos que son completamente de fibra, en los cuales la perturbación actúa directamente sobre la fibra y modula la señal de luz dentro de la misma. Los sensores extrínsecos o híbridos, son aquellos donde la fibra actúa solo como un conductor para transmitir la luz hacia un dispositivo modulador de la luz. Esta modulación de la luz ocurre fuera de la fibra a través de un cambio inducido o ambiental.

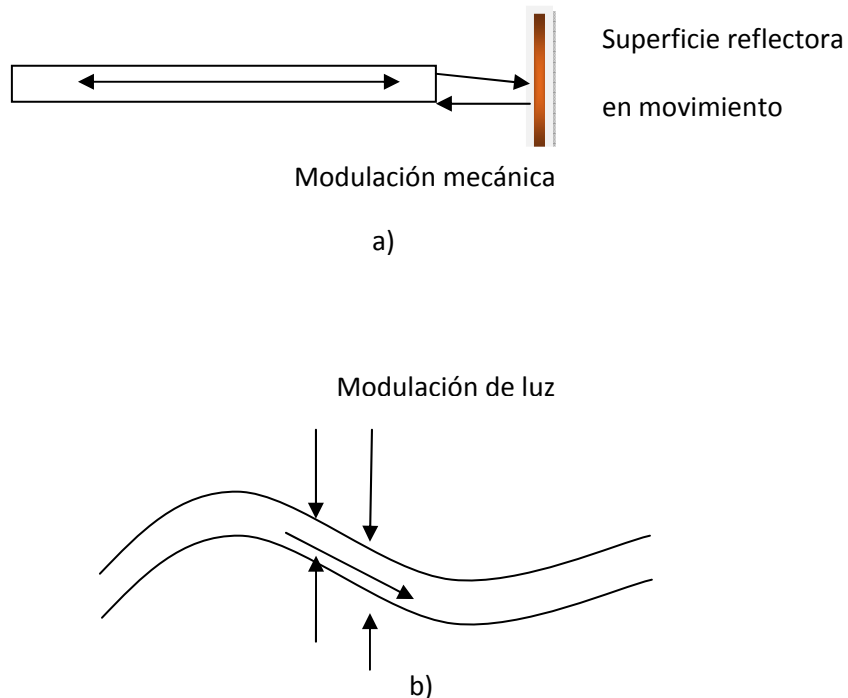


Figura 7 .Representación esquemática de los dos grupos de sensores de fibra óptica.
a) Sensor extrínseco; b) Sensor intrínseco.

II.6. Sensores interferométricos

Los sensores interferométricos de fibra óptica son usados cuando se requiere una alta sensibilidad en la detección (Jackson, D A. 1985). La mayoría de los sensores interferométricos usan fibra monomodo. El marcado incremento de la sensibilidad en el sensor cuando se usa fibra óptica monomodo surge debido a que éstas facultan la construcción de interferómetros con la propia fibra, permitiendo la medición de pequeños cambios de fase en la luz transmitida a través de la fibra, la cual es sometida a un parámetro físico a medir. Esto se logra al comparar la fase de una onda de luz que ha atravesado la trayectoria de detección con la fase de una onda de luz, proveniente de la misma fuente que no ha estado sujeta a la acción del estímulo. La ausencia de espacio libre entre el camino óptico de la fuente y los detectores elimina la posibilidad de que se presenten problemas de alineación, lo cual sí puede ocurrir si se usa un interferómetro óptico convencional.

Cualquier cosa que cambie las propiedades ópticas de la fibra producirá un cambio en la señal. Debido a que existen una multitud de efectos sobre la fibra que pueden cambiar sus propiedades ópticas, se debe poner mucha atención en la reducción o compensación de esos cambios no deseados. Cuando se usan fibras que no mantienen el estado de polarización de la luz, pueden ocurrir cambios severos en la polarización, dando lugar a un desvanecimiento completo de la señal del interferómetro si las ondas de luz llegan a combinarse con polarizaciones ortogonales. Si se usa una fibra monomodo estándar, se debe agregar al arreglo del interferómetro, controladores de polarización para reducir problemas de polarización.

La implementación de los diversos arreglos interferométricos con fibra óptica se han derivado de los diseños de interferómetros clásicos. Estas configuraciones incluyen los interferómetros tipo Fabry-Perot, Michelson, Mach-Zender y Sagnac (figura 8).

Para obtener todas las ventajas de su potencial de sensibilidad, los sensores de fibra óptica requieren fuentes altamente coherentes, muy estables, con bajo ruido de fase. Cuando se usa este tipo de fuentes normalmente no se puede lograr la calibración absoluta de la diferencia de fase y surge un límite en el rango dinámico 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 alta sensibilidad, deseado para el sensor.

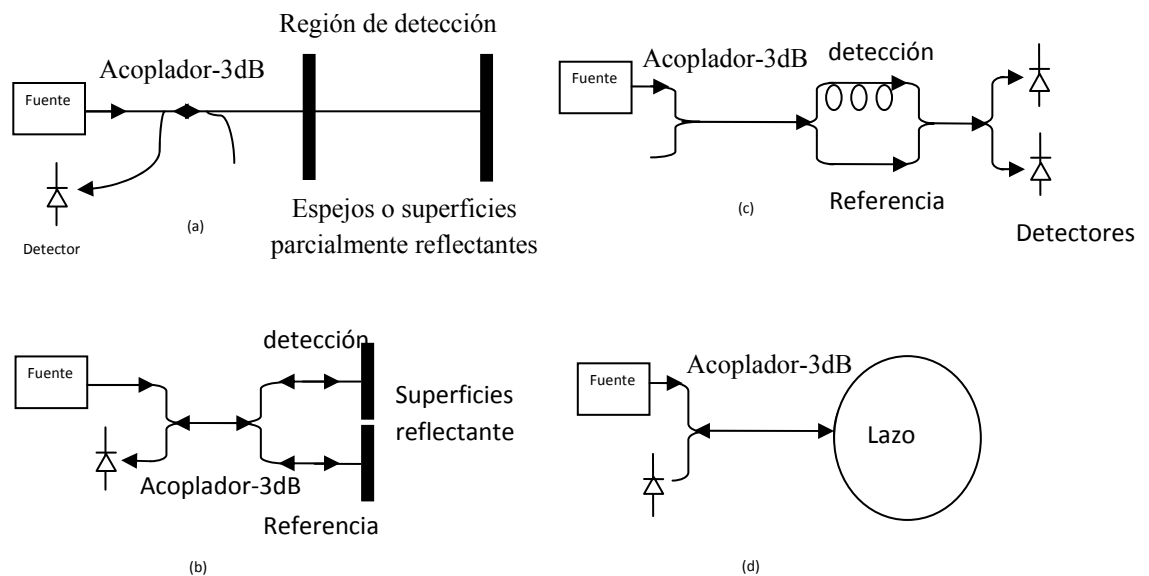


Figura 8. Arreglos interferométricos de sensores de fibra óptica. a) Fabry-Perot; b) Michelson; c) Mach-Zender; d) Sagnac.

II.7. Interferometría de baja coherencia

Una característica primordial de los sensores basados en la interferometría de baja coherencia es que la exactitud de la medición es virtualmente insensible a 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. Además estos sensores tienen una alta sensibilidad y amplio rango dinámico.

El esquema general de un sensor interferométrico de baja coherencia se muestra en la figura 9. La luz de una fuente no monocromática es transmitida a un sensor interferométrico a través de un acoplador direccional de fibra óptica. Como la longitud de coherencia de fuentes no monocromáticas es mucho menor que la de un láser, éstas son llamadas fuentes de baja coherencia y consecuentemente cualquier arreglo interferométrico que use luz de ancho espectral amplio es llamado interferometría de baja coherencia o de luz blanca. Las fuentes utilizadas en esta técnica son principalmente LEDs cuya distribución espectral en intensidad es cercana a una gaussiana o un láser sintonizable, que es el que se utilizó en este trabajo de tesis.

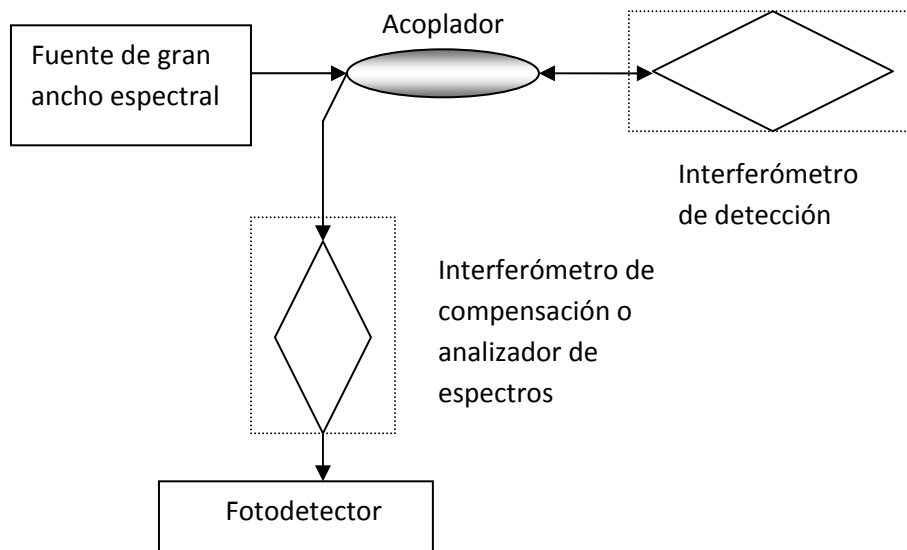


Figura 9. Esquema básico de sensor interferométrico de baja coherencia.

En el sensor, la amplitud de la luz incidente es dividida en los dos brazos del interferómetro, generándose una diferencia de camino óptico entre ellos como respuesta a la acción del mensurando. El sensor se diseña de tal forma que exista una relación definida entre la diferencia de camino óptico y el mensurando. La intensidad de la luz en la salida del interferómetro de compensación depende de la diferencia de camino óptico. La señal de

salida del interferómetro, 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 para generar una señal eléctrica de la cual se deriva la diferencia de camino óptico y el mensurando.

II.7.1. Procesamiento en el dominio de la fase

En el procesamiento en el dominio de la fase el elemento utilizado para el procesamiento óptico es un interferómetro no balanceado. En el arreglo interferómetro/interferómetro, el interferómetro sensor está localizado dentro del área de medición, mientras que el interferómetro de compensación generalmente es colocado en un ambiente controlado, alejado del área de medición. Las diferencias de camino óptico (ΔL_1 y ΔL_2) de cada interferómetro son, por lo general, más grandes que la longitud de coherencia de la fuente Ec.4, de tal manera que las franjas de interferencia no pueden ser observadas con cada uno de los interferómetros cuando estos son utilizados individualmente. Las ondas de luz que regresan del interferómetro sensor son incoherentes temporalmente. La función del interferómetro de procesamiento consiste en restablecer el efecto de interferencia devolviendo a estas ondas la coherencia temporal. Es posible que exista interferencia a la salida del interferómetro receptor, siempre y cuando la diferencia de camino óptico del interferómetro receptor sea ajustada para igualar la diferencia de camino óptico del interferómetro sensor con la longitud de coherencia de la fuente. La función de intensidad a la salida del arreglo está dada por Ec.5:

$$L_c = \frac{\lambda_o^2}{\Delta\lambda}, \quad (4)$$

donde $\Delta\lambda$ y λ_o son el ancho espectral y la longitud de onda central de la fuente respectivamente.

$$I(k, \Delta L_1, \Delta L_2) = [I_0(k)] [1 + m(\Delta L_1 - \Delta L_2) \cos(k(\Delta L_1 - \Delta L_2))]. \quad (5)$$

donde $m(\Delta L_1 - \Delta L_2)$ representa la visibilidad de las franjas, $I_o(k)$ representa la intensidad de la fuente óptica, y $k = 2\pi/\lambda$.

La fase y la visibilidad de las franjas de la señal resultante son función de la diferencia de camino óptico de los dos interferómetros.

II.7.2. Procesamiento en el dominio espectral

La técnica basada en el procesamiento del dominio espectral utiliza un analizador de espectros (espectrómetro) como el elemento de procesado óptico. En el arreglo interferómetro/espectrómetro, la salida del sensor interferométrico es conducida al espectrógrafo a través de una fibra conectora. El espectrógrafo es un aparato utilizado para medir la distribución espectral de la potencia de la luz. El uso de un fotodetector multicanal permite obtener el espectro de la luz en forma de una señal eléctrica. El espectrógrafo nos permite obtener directamente el espectro de potencia de la radiación a la salida del arreglo, $I(k)$, con una resolución espectral de $R_0 = 1\text{nm}$. Si la fuente de ancho espectral es un LED con distribución espectral gaussiana, entonces el espectro a la salida del interferómetro está dado por Ec.6.

$$I(k) = [I_o(k)] [1 + \cos(\varphi)], \quad (6)$$

donde $\varphi = 2\pi n \Delta L / \lambda$ es la diferencia de fase y ΔL es la diferencia de camino óptico. Esta función es el producto de las franjas periódicas del coseno con 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, ΔL , en el interferómetro y de la longitud de onda de la fuente. Los máximos de estas franjas ocurren cuando

$$k * \Delta L = 2\pi q, \quad (7)$$

donde q es el orden de interferencia.

La separación entre franjas adyacentes o periodo de modulación de la señal de salida del interferómetro de detección, en el espacio de longitud de onda, está dada por

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\Delta n L} \approx \frac{\lambda_0^2}{\Delta n L}. \quad (8)$$

Esta relación nos indica que las franjas empiezan a compactarse cada vez más conforme se incrementa el desbalance del interferómetro. Se tiene que el valor mínimo posible de la separación de las franjas está dado por

$$\Lambda_{\min} = 2R_0, \quad (9)$$

donde R_0 es la resolución del espectrómetro. Por consiguiente, el máximo cambio de fase espectral $\Delta\varphi_{\max}$ que se da es.

$$\Delta\varphi_{\max} = 2\pi * \Delta q_{\max}, \quad (10)$$

donde Δq_{\max} es el número máximo de franjas espectrales detectables. Con lo cual obtenemos que

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{\pi\lambda}{R_0}. \quad (11)$$

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

$$\Lambda = \Delta\lambda, \quad (12)$$

donde $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

La máxima diferencia en longitud de camino óptico ΔL_{\max} que puede tener el interferómetro sensor, depende de la resolución del espectrómetro. Esta longitud máxima representa la longitud de coherencia para la técnica del dominio espectral, la cual se determina a partir de las Ecs.8. y Ecs.9.

$$\Delta nL_{\max} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2R_0} \approx \frac{\lambda_0^2}{2R_0}. \quad (13)$$

Existe otro esquema dentro del mismo procesamiento en el dominio espectral, el cual consiste en utilizar un láser sintonizable como fuente óptica y un fotodetector como elemento de conversión de señal óptica a eléctrica. En este esquema la resolución espectral está dada por el ancho de línea del láser (R_o).

Además de la resolución óptica tenemos la resolución electrónica, la cual se origina al muestrear el barrido de láser en un periodo de tiempo determinado. Utilizando la Ec.14 podemos calcular el número de muestras obtenidas en un barrido del láser.

$$N = T_{\text{barrido}} F_s, \quad (14)$$

donde T_{barrido} es el periodo de tiempo que tarda el láser en hacer un barrido de una λ_{inicial} a una λ_{final} , F_s es la frecuencia de muestreo de nuestro sistema de adquisición de datos, N es el número de muestras.

Teniendo el número de muestras N y sabiendo el ancho del barrido del láser, es posible calcular la resolución electrónica del sistema mediante la Ec.15.

$$R_e = \frac{\lambda_{\text{final}} - \lambda_{\text{inicial}}}{N - 1}. \quad (15)$$

En este esquema de baja coherencia en donde se utiliza un láser sintonizable y un fotodetector la resolución que se utiliza, para obtener los cálculos mencionados anteriormente, es el ancho de línea espectral del laser R_o .

Una de las principales ventajas de utilizar un láser sintonizable en comparación con un LED, es que regularmente la eficiencia de acoplamiento láser-fibra es más alta comparada con un acoplamiento LED-Fibra, por tanto es posible tener una mayor distancia entre la fuente, el sensor y la unidad procesadora. Otra ventaja que se tiene al utilizar este esquema, es la resolución espectral. Generalmente, la resolución está limitada por el ancho

espectral del láser. Al utilizar un LED y un espectrógrafo, se carece de alta resolución debido a que un espectrógrafo utiliza una matriz de fotodetectores para la medición de distribución de intensidad y estos mismos fotodetectores están separados entre sí, lo que provoca que tengamos zonas del espectro que no podemos medir, reduciendo nuestra resolución espectral.

Al utilizar el esquema de un láser sintonizable y un fotodetector se abre la posibilidad de experimentar el uso de interferómetros en serie, pues al tener una mayor resolución es posible distinguir entre la señal generada por un interferómetro, del resto del sistema. Esto permite el desarrollo de un sistema de multiplexado de sensores en serie, que es el objetivo de este trabajo de tesis.

II.8. Técnicas de Multiplexado de sensores de fibra óptica

Una gran variedad de sensores interferométricos de fibra óptica han sido desarrollados en la actualidad, utilizando distintas configuraciones ópticas y técnicas de procesamiento de señales. Recientemente ha crecido el interés en multiplexar dichos sensores en un solo sistema para evitar duplicar las fuentes de luz, fotodetectores y líneas de transmisión por fibra.

En la actualidad se han desarrollado varios esquemas de multiplexado de sensores de fibra óptica. En esta sección se presentarán algunos esquemas o técnicas de multiplexado que han sido desarrollados para los interferómetros de anillo (Farahi et al, 1989). Aunque no son el tipo de sensores que se utilizan en este trabajo de tesis, vale la pena mostrarlos como antecedentes.

Varias técnicas se han publicado previamente: multiplexado por división de tiempo (time-division multiplexing), multiplexión por coherencia, multiplexado por longitud de onda (wavelegth-division multiplexing) y multiplexado por división de frecuencia

(frequency-division multiplexing). La combinación de direccionamiento en tiempo con multiplexión por coherencia y direccionamiento en tiempo con multiplexado por división de frecuencia, han reportado un avance en el incremento del número de sensores en un sistema.

Otra alternativa consiste en usar un resonador de anillo. Este es un interferómetro de haces múltiples, de alta fineza debido a la utilización de acopladores direccionales de fibra óptica, los cuales satisfacen la condición de resonancia. Sin embargo, cuando el sistema es iluminado por una fuente de luz de baja coherencia con lo que no es posible tener interferencia utilizando un solo interferómetro de anillo. Es indispensable tener dos interferómetros de anillo de longitudes iguales en el arreglo para que pueda existir interferencia. Un resonador se utiliza como sensor y el otro resonador se utiliza como receptor; en este último se incorpora un elemento activo (piezoeléctrico) necesario para el procesamiento de señales. (Figura 10).

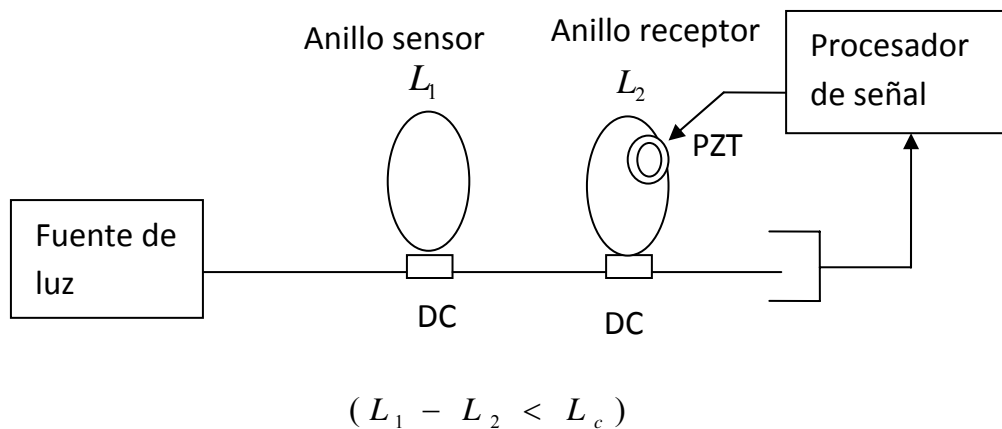


Figura 10. Esquema de sensor de anillo: DC = Acoplador direccional; PZT

II.8.1. Multiplexado por coherencia

El multiplexado por coherencia es implementado en interferómetros en los que la fuente de luz tiene una coherencia baja. Los interferómetros son desplegados en par: uno de ellos es el interferómetro sensor y el otro es el interferómetro de recepción (Figura 11). Aunque cada interferómetro tiene una longitud grande en comparación con la longitud de coherencia de la fuente, para cada par, la diferencia de camino óptico en desbalance es menor que la longitud de coherencia de la fuente.

El arreglo de la figura 11 es iluminado por una fuente de luz de baja coherencia ($L_c \cong 5mm$). Los resonadores de anillo fueron hechos usando acopladores de fibra óptica con factor de acoplamiento κ de 0.5 y una cavidad de anillo cuyas longitudes son de:

$$R_a = R'_a = 195cm.$$

$$R_b = R'_b = 214cm.$$

$$\text{donde } |R_i - R'_i| \ll L_c.$$

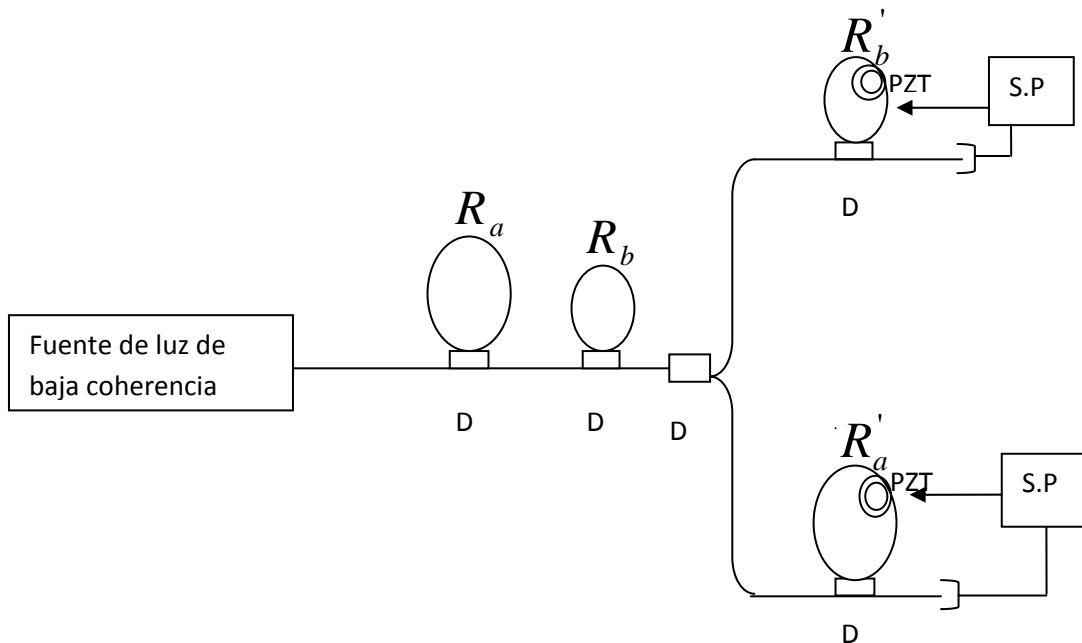


Figura 11. Esquema de multiplexado por coherencia. SP=Procesamiento de señal.

II.8.2. Multiplexado por división de frecuencia

En la figura 12 se muestra el esquema de multiplexado por división de frecuencia, el cual es un esquema en serie que está formado por anillos de baja fineza, cada uno de ellos pueden ser considerado como un interferómetro de dos haces. En la práctica este arreglo puede construirse utilizando acopladores direccionales con coeficiente de acoplamiento lejos del valor de resonancia. Suponga que el primer anillo tiene un camino óptico de $m_1 L_0$ donde m_1 es entero. El láser es modulado por una onda de rampa.

Consideremos un solo anillo, en la salida tendremos una onda que se asemeja a una señal seno, con una concentración de potencia a una frecuencia $m_1 f$ donde f es la frecuencia de la señal rampa que modula al láser.

Ahora consideremos dos anillos conectados en serie. Las señales de salida se observaran a frecuencias $m_1 f$ y $m_2 f$ correspondientes a el primer y segundo anillo respectivamente, las cuales pueden ser distinguidas al aplicar un filtro pasa-bandas. También se observan a la salida del arreglo señales a $(m_1 - m_2) f$ y $(m_1 + m_2) f$. Para evitar cruzamiento en frecuencia es necesario seleccionar adecuadamente valores de m_1 y m_2 . Un ejemplo de estos valores sería $m_1 = 1$ y $m_2 = 3$.

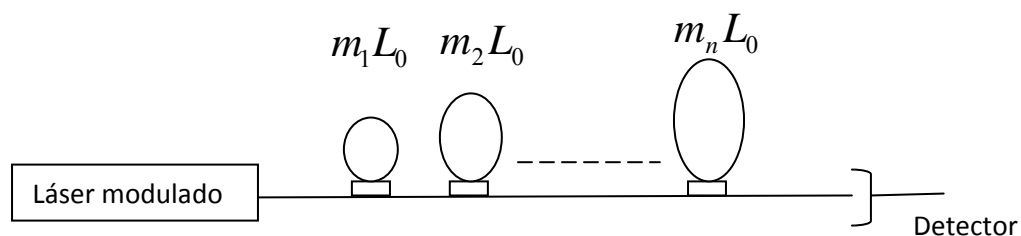


Figura 12. Esquema de multiplexado por división de frecuencia.

En la práctica este método sufre de muchas desventajas. La diferencia de camino entre los sensores es grande y rápidamente se excede la longitud de coherencia (L_c) de la fuente. Un esquema alternativo se muestra en la figura 13. Este comprende un arreglo de sensores de anillo de longitud $L_1, L_2 \dots L_n$, con un interferómetro receptor de longitud L_r y una fibra de retraso entre cada sensor de longitud mayor que el valor L_c de la fuente. Esto es para prevenir la mezcla coherente entre cualquiera de los dos sensores interferométricos. Para un desempeño satisfactorio es necesario que:

$$L_i, L_r > L_c,$$

y que,

$$|L_i - L_r| < L_c.$$

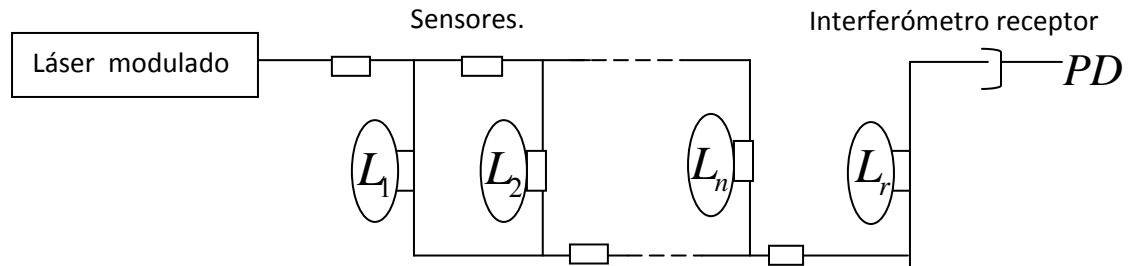


Figura 13. Esquema en paralelo de multiplexado por división de frecuencia interrogado por sintonización coherente mediante un interferómetro receptor.

II.8.3. Combinación de multiplexado por coherencia y división de frecuencia

Es posible combinar las técnicas de multiplexado por división de frecuencia y por coherencia, el arreglo esquemático se muestra en la figura 14. Los sensores son colocados en un sub arreglo P el cual contiene n sensores de longitud $L_{i,j}$. Cada sub-arreglo es separado por una fibra de retraso mayor que la longitud de coherencia de la fuente. Cada

sub-arreglo es interrogado por su propio interferómetro receptor de longitud $L_{r,i}$. Como antes se necesita que:

$$L_{i,j}, L_{r,i} > L_c; \quad i=1,\dots,P; \quad j=1,\dots,n.$$

Para poder interrogar al sub-arreglo S_i con el interferómetro de recepción R_i se requiere que:

$$|L_{i,j} - L_{r,i}| < L_c.$$

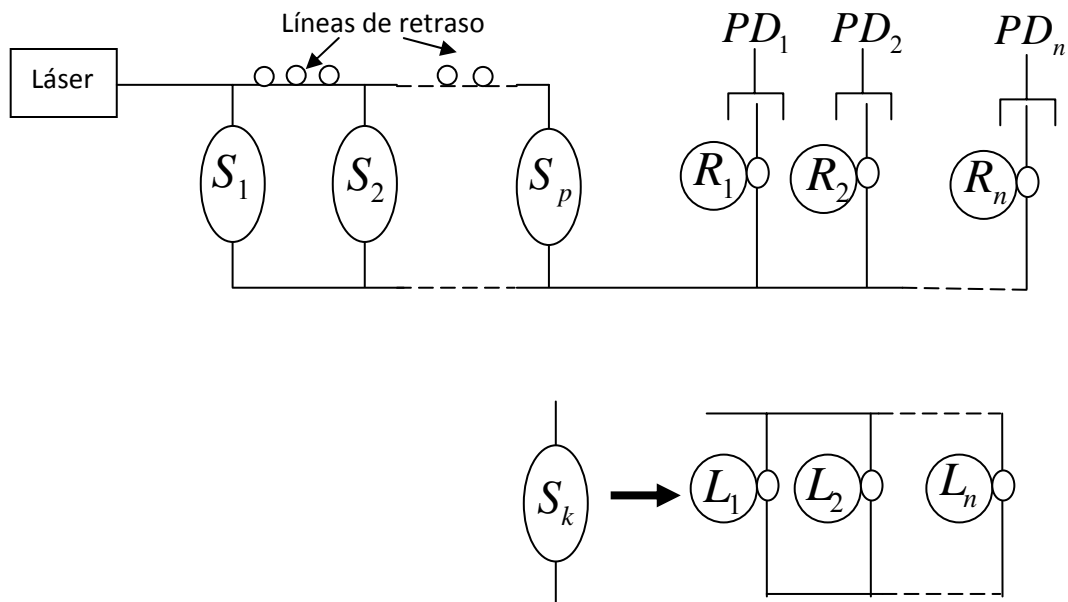


Figura 14. Arreglo de sensores combinando multiplexado por división de frecuencia y Multiplexado por división de coherencia.

Para evitar el cruzamiento en frecuencia la cual es interferencia entre los sensores del sub-arreglo i con el sub-arreglo de interferómetros de recepción $k, i \neq k$ entonces

$$|L_{i,j} - L_{r,k}| > L_c.$$

Un ejemplo de este sistema sería el siguiente. Para una fuente con longitud de coherencia de 100cm, es posible realizar un arreglo compuesto por interferómetros de anillo con las siguientes longitudes:

$$\begin{array}{llll}
 L_{r1} = 110, & L_{11} = 120, & L_{21} = 140, & L_{31} = 190, \\
 L_{r2} = 300, & L_{12} = 290, & L_{22} = 270, & L_{32} = 220, \\
 L_{r3} = 400, & L_{13} = 410, & L_{23} = 430, & L_{33} = 480.
 \end{array}$$

Conclusiones.

La intención de este capítulo ha sido la de presentar, de manera sencilla, los conceptos básicos que se requerirán para la comprensión de este trabajo de tesis.

En este capítulo se mostró el principio de transmisión de la luz en fibras ópticas. Se mostraron los diferentes tipos de fibra y tipos de fibras que preservan la polarización. Se dio una breve descripción de lo que es birrefringencia y como es que se induce birrefringencia en fibras que preservan la polarización. Se introdujo el esquema básico de un sensor de fibra óptica y de los parámetros de la luz que pueden ser cambiados.

Clasificamos los tipos de sensores de fibra óptica en dos grupos básicos (intrínsecos y extrínsecos). Vimos ventajas y desventajas de los sensores interferométricos, al igual que se mencionaron las ventajas de utilizar sensores interferométricos con el método de baja coherencia. Además se mostraron las técnicas de procesado utilizadas en interferometría de baja coherencia. Finalmente se mostró un resumen de los tipos de multiplexado de sensores de anillo que han sido desarrollados en el ámbito científico.

Capítulo III

El interferómetro de Sagnac

Introducción

En este capítulo nos enfocaremos en explicar el funcionamiento básico de un interferómetro de Sagnac, cuales son sus aplicaciones más comunes y además se explicará el funcionamiento del interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente. Utilizando como herramienta teórica el calculo de Jones para obtener las funciones de transmitancia y reflectancia de dicho interferómetro.

III.1. El interferómetro de Sagnac

La estructura de un interferómetro de Sagnac convencional de fibra óptica se forma mediante un acoplador direccional de fibra óptica con cuatro puertos, en donde el puerto de entrada es el puerto P1, los puertos P3 y P4 se unen para formar una trayectoria cerrada como se muestra en la figura 15 y por el puerto P2 de salida, tenemos nuestra onda transmitida.

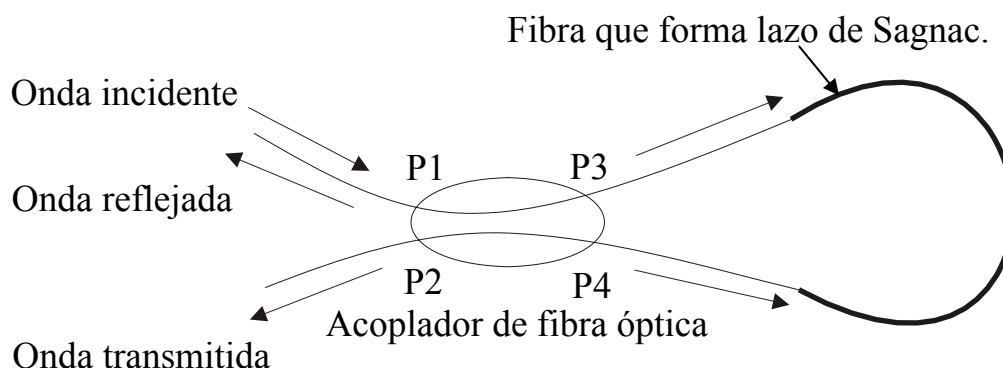


Figura 15. Esquema de trayectorias que recorre la luz en un interferómetro tipo Sagnac.

III.2. El interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente

El interferómetro de Sagnac con fibra altamente birrefringente, HBF por sus siglas en inglés (High Birefringence Fiber), está formado de la misma manera que un interferómetro de Sagnac convencional como se muestra en la figura 15. Solo que la fibra que une los puertos P3 y P4 del acoplador de fibra óptica, es una HBF torcida $\pi/2$. La fibra birrefringente y su torsión representan la diferencia principal respecto al interferómetro de Sagnac convencional.

Cuando una señal entra por el puerto P1, el acoplador de fibra divide a esta señal en dos campos de amplitud complementarias uno de las cuales continua propagándose a través de la misma fibra por la que entro, mientras que el otro campo se transmite por la segunda fibra del acoplador, adquiriendo un cambio de fase de $\pi/2$. Las ondas de luz salen por los puertos P3 y P4 para posteriormente entrar a la sección de fibra altamente birrefringente y propagarse a través del lazo en direcciones opuestas.

Después de que las ondas han recorrido totalmente la trayectoria cerrada, éstas entran de nuevo al acoplador de fibra óptica donde interferirán dando lugar a dos señales de amplitudes complementarias que pueden ser observadas en los puertos P1 y P2 como se muestra en la figura 15.

El interferómetro de Sagnac ha sido estudiado extensamente, la mayoría de las investigaciones (D.B.Mortimore, 1988; X,Fang et al,1997) han basado el análisis de su funcionamiento en el formalismo de Jones. E.A.Kuzin et al. (1997) explicaron de forma sencilla y clara el principio de operación del interferómetro de Sagnac con HBF torcida. Está explicación se basa en la suposición de que si se tiene un campo de luz que entra por el puerto P1, con polarización lineal paralela a cualquiera de los ejes principales de la fibra, al propagarse este campo por el acoplador de fibra este es separado en dos campos de amplitud complementaria, entonces la polarización lineal de los campos que salen por los puertos P3 y P4 coincide con el eje lento de la fibra birrefringente en el puerto P3 y con el eje rápido de la fibra birrefringente en el puerto P4. Los ejes rápido y lento corresponden a los ejes principales de la fibra birrefringente y tienen diferentes índices de refracción denotados como, n_x y n_y , respectivamente. Los campos que recorren el lazo de Sagnac en direcciones contrarias, propagándose a través de diferentes índices de refracción, presentan una diferencia de fase entre ellos. Después de recorrer la trayectoria cerrada y salir de la fibra los haces tienen polarización lineal y paralela entre sí, pero ortogonal a la polarización con la cual entraron a la fibra. Al volver a pasar por el acoplador, éstas dos ondas interferirán dando lugar a una señal cosenoidal en la salida del interferómetro, que depende de la diferencia de fase φ entre los campos. Esta diferencia de fase depende de la birrefringencia Δn , la longitud de la fibra L y de la longitud de onda de la luz λ .

Para calcular la intensidad a las salidas del interferómetro utilizando el cálculo de Jones, es necesario determinar las matrices de Jones correspondientes a cada elemento secuencial de la trayectoria óptica que recorre el campo de luz en el interferómetro de Sagnac. Si consideramos un campo de entrada en el puerto P1 con polarización arbitraria, representado por el vector de Jones:

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

El campo de luz pasa a través del acoplador direccional, el cual divide la amplitud de E_1 en dos señales complementarias las cuales dependen de la razón de acoplamiento del

Las ecuaciones 17 y 18 pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$C_d = \alpha^{1/2} U, \quad (19)$$

$$C_i = j(1 - \alpha)^{1/2} U, \quad (20)$$

donde U es una matriz unitaria de 2x2.

Después de que los campos salen por los puertos P3 y P4, viajan alrededor del lazo en direcciones opuestas y sus componentes X y Y recorren diferentes longitudes de camino óptico. Las características del lazo pueden ser representadas por dos matrices de Jones J_F y J_C , para la propagación a favor de las manecillas del reloj y la propagación en contra de las manecillas del reloj, respectivamente.

Si suponemos que la torsión es pequeña a lo largo de la fibra birrefringente, de manera que no provoque acoplamiento de modos de polarización, tenemos como consecuencia que estas matrices de Jones están dadas de la siguiente manera:

$$J_F = R(\theta)T, \quad (21)$$

$$J_C = TR(-\theta), \quad (22)$$

donde la matriz de T representa la matriz de Jones para una fibra con birrefringencia lineal definida como (Saleh y Teich,1991):

$$T = \begin{bmatrix} e^{i\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\varphi}{2}} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

En la Ec.23, $\varphi = 2\pi\Delta nL/\lambda$ es el cambio de fase que sufren los dos modos de polarización, R es la matriz de rotación ocasionada por la torsión de la fibra en los puertos P3 y P4, la cual se representa por:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (24)$$

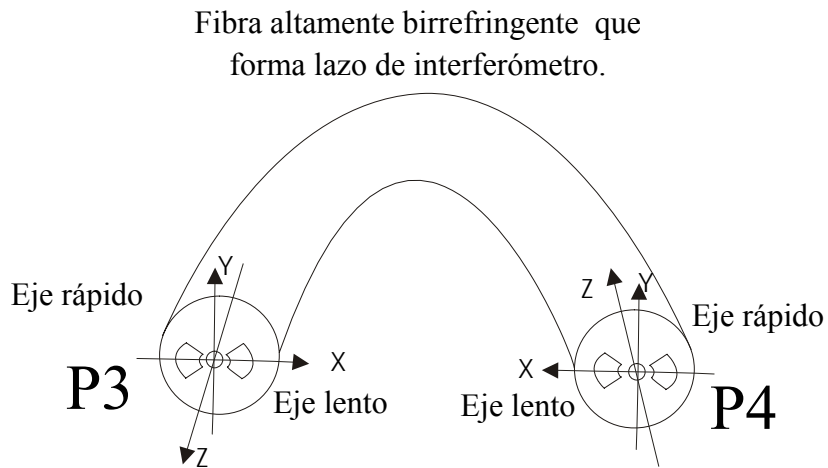


Figura 17. Esquema de ejes requerido para expresar el lazo de fibra birrefringente sin torsión.

Otra cosa que se debe tomar en cuenta es el cambio de dirección de 180° de la coordenada Y, ocasionado por la curvatura de la fibra birrefringente al formar el lazo. Este cambio de dirección se incluye mediante la incorporación de una matriz de conversión U_x , entre los dos sistemas de coordenadas:

$$U_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (25)$$

donde el signo menos representa el cambio de dirección de 180° de la coordenada X.

En la figura 18 se muestra la fibra birrefringente con torsión de $\pi/2$, debido a esta torsión suponemos que las componentes E_x y E_y son paralelas a los ejes rápido y lento de la fibra birrefringente en el puerto P3 y P4 respectivamente. Con lo que los dos modos de polarización se propagan a lo largo del lazo del interferómetro de Sagnac con velocidades diferentes.

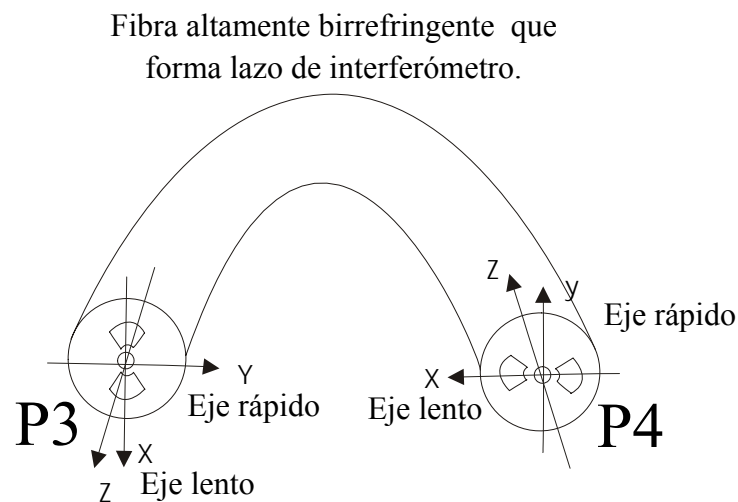


Figura 18. Esquema de ejes requerido para expresar el lazo de fibra birrefringente torcida con un ángulo $\pi/2$.

El interferómetro de Sagnac se puede describir esquemáticamente mediante un diagrama de bloques que representa la perturbación que sufre la luz al pasar por cada uno de los elementos que conforman una trayectoria determinada.

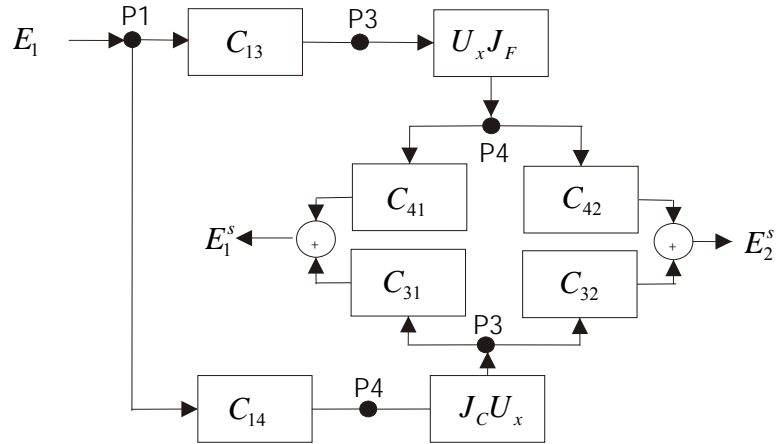


Figura 19. Diagrama de bloques que describe al interferómetro de Sagnac de fibra óptica.

La respuesta del interferómetro al campo de entrada E_1 puede ser escrita de la siguiente forma:

$$E_i^s = C_{4i} U_x J_F C_{13} E_i + C_{3i} J_C U_x C_{14} E_i, \quad (26)$$

donde $i=1,2$. Como resultado de esta expresión matricial se obtiene la matriz de transmitancia de Jones del interferómetro de Sagnac:

$$E_2^s = \begin{bmatrix} \alpha e^{-i\varphi/2} E_{1y} - (1-\alpha) e^{i\varphi/2} E_{1y} \\ \alpha e^{i\varphi/2} E_{1x} - (1-\alpha) e^{-i\varphi/2} E_{1x} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

De la matriz anterior tenemos que la intensidad de salida en el puerto P2 es $I = |E_{2x}^s|^2 + |E_{2y}^s|^2$, es decir.

$$I = I_0 [1 - 2\alpha(1-\alpha)(1 + \cos \varphi)]. \quad (28)$$

En donde tenemos que I_o es la intensidad a la entrada del puerto P1 y $\varphi = 2\pi\Delta nL/\lambda$ es la diferencia de fase que adquieren las componentes del campo al transmitirse por el interferómetro de Sagnac, Δn es la birrefringencia de la fibra que forma el lazo del interferómetro en los puertos P3 y P4 y L es la longitud de la sección de está misma fibra.

Siguiendo con el cálculo matricial tenemos ahora que la matriz de reflectancia del interferómetro de Sagnac es la que se muestra a continuación:

$$E_1^s = \begin{bmatrix} j(1-\alpha)^{1/2}\alpha^{1/2}e^{-i\varphi/2}E_{1y} + j(1-\alpha)^{1/2}\alpha^{1/2}e^{i\varphi/2}E_{1x} \\ j(1-\alpha)^{1/2}\alpha^{1/2}e^{i\varphi/2}E_{1x} + j(1-\alpha)^{1/2}\alpha^{1/2}e^{-i\varphi/2}E_{1y} \end{bmatrix}. \quad (29)$$

De la matriz anterior podemos ver que la intensidad de salida en el puerto P1 es $I = |E_{1x}^s|^2 + |E_{1y}^s|^2$, es decir,

$$I = I_o \left[2\alpha(1-\alpha)(1 + \cos \varphi) \right]. \quad (30)$$

Podemos ver que tanto la Ec.28 como la Ec.30 nos muestran que la intensidad en las salidas del interferómetro de Sagnac no depende de la polarización de la luz que entra al interferómetro, pero si del cambio de fase entre las ondas que se transmiten en direcciones opuestas a través de la fibra birrefringente que forma el lazo del interferómetro. Como es sabido los cambios de temperatura en la fibra birrefringente producen cambios en la diferencia de camino óptico ($DCO = \Delta nL$) de la fibra y esto a su vez provoca cambios en la diferencia de fase entre las ondas que se transmiten a través del lazo de Sagnac.

III.3. Aplicaciones del interferómetro de Sagnac

En esta sección se mencionarán las aplicaciones más comunes del interferómetro de Sagnac sin entrar en detalles sobre cada una de ellas.

Dentro de la historia de las fibras ópticas se encuentra un instrumento que ha sido calificado (Burns ,1994) como la joya de los sensores de fibra óptica, el giroscopio de fibra óptica. El fenómeno básico en el cual se basa el sensado de rotación es conocido como 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 cuando este lazo es rotado alrededor de su eje normal. Esta diferencia de camino óptico es proporcional a la rotación absoluta y forma la base de todos los giroscopios ópticos.

Como mostramos en la sección anterior, el interferómetro de Sagnac puede ser utilizado como sensor de temperatura, en donde el uso de fibras especiales en la trayectoria cerrada del interferómetro hace posible medir los cambios de temperatura a los cuales es sometida dicha fibra. Cabe mencionar que esta aplicación del interferómetro de Sagnac es la que se utilizó en este trabajo de tesis con el fin de desarrollar la técnica de multiplexado de sensores.

El interferómetro de Sagnac puede ser utilizado para medir campos magnéticos. En esta aplicación se utiliza un acoplador de fibra óptica polarizado, fibra HBF en paralelo con los ejes del acoplador de fibra óptica y un elemento rotador de Faraday en el centro del lazo de Sagnac, el cual hace posible introducir un cambio en el estado de polarización de la luz, proporcional a los cambios del campo magnético aplicado al mismo rotador de Faraday, lo que se traduce en cambios de intensidad a la salida del interferómetro (M.J.Marrone et al, 1993).

Otra aplicación común del interferómetro de Sagnac es la medida esfuerzos mecánicos. Al someter a la fibra HBF que forma el lazo de Sagnac a estiramientos,

compactado o presión. Cambia la diferencia de camino óptico (DCO) del interferómetro, lo que se traduce en un cambio de intensidad o cambio de fase en el patrón de interferencia (en caso de utilizar baja coherencia). De manera que es posible medir con precisión el esfuerzo al cual es sometida la fibra que forma el lazo de Sagnac.

Además de ser utilizado para medir parámetros físicos, el interferómetro de Sagnac ha sido utilizado en diversas aplicaciones. Una de ellas es como filtro selector de longitud de onda en sistemas de comunicaciones por fibra óptica. En esta aplicación la configuración del interferómetro de Sagnac es la misma que la utilizada como sensor de temperatura. Debido a esto es de vital importancia mantener la temperatura constante en el lazo de Sagnac para poder seleccionar una longitud de onda determinada de una línea de comunicaciones por fibra óptica (X.Fang y R.O.Claus, 1995; D.Monzon et al,1997). En esta misma aplicación se ha demostrado que con el uso de fibras PM-PCF por sus siglas en inglés (Polarization-maintaining photonic cristal fiber), se tiene una insensibilidad a la temperatura, lo que permite seleccionar longitudes de onda en canales de comunicaciones por fibra óptica, sin cuidar tanto las condiciones ambientales de temperatura a las cuales es expuesto el interferómetro (D.H.Kim y J.U.Kang, 2004). Siguiendo con las aplicaciones en comunicaciones por fibra óptica, el interferómetro de Sagnac ha sido utilizado como modulador de fibra óptica, teniendo como principal ventaja su insensibilidad a la polarización de la señal de entrada (A.Yu and A. S. Siddiqui, 1994; A.Garcia-Weidner et al, 2003).

El interferómetro de Sagnac también puede ser utilizado como hidrófono. En esta aplicación el interferómetro de Sagnac utiliza fibra monomodal en su lazo, pero con la particularidad que la fibra debe ser lo suficientemente larga para formar dos embobinados de la misma longitud. Una de estas bobinas es aislada de la señal hidroacústica para ser utilizada como bobina de referencia y la otra bobina es sometida a la señal hidroacústica. Al variar la diferencia de camino óptico producido por los sonidos en el agua se tiene una variación en la intensidad de salida del interferómetro proporcional a esta señal hidroacústica (K.Krakesnes y K.Blotekjaer,1989).

Existen varios trabajos en donde se utilizan interferómetros de Sagnac para medir ondas gravitacionales haciendo uso de técnicas heterodinas para el procesado de señales del interferómetro (P. T. Beyersdorf, et al. 1999).

Otra de las aplicaciones del interferómetro de Sagnac es como medidor de potencias láser. Se forma un calorímetro de fibra óptica con dos sensores de temperatura basados en un interferómetro tipo Sagnac con fibra birrefringente. Un sensor mide la temperatura del material absorbente del calorímetro la cual depende de la potencia de la radiación láser incidente, mientras que el otro sensor monitorea los cambios de temperatura en la cabeza del calorímetro (J. Tapia- Mercado, et al. 2000)

Conclusiones.

La intención de este capítulo fue la de mostrar de una manera sencilla como está compuesto y como funciona el interferómetro Sagnac de fibra óptica. Además se hizo una breve descripción de algunas aplicaciones del interferómetro de Sagnac.

Se explicó el funcionamiento del interferómetro de Sagnac cuando la fibra que une los puertos P3 y P4 del acoplador de fibra óptica, para formar el lazo del interferómetro, es una fibra birrefringente. Para esto se utilizó el cálculo de Jones con la finalidad de obtener una matriz característica de dicho interferómetro tanto para transmitancia como para reflectancia. Asimismo, se obtuvieron las funciones de transmitancia y reflectancia, en intensidad, del interferómetro de Sagnac.

Con base en la obtención de dichas funciones de transmitancia y reflectancia observamos que el interferómetro de Sagnac es un interferómetro en el cual la señal de salida no depende del estado de polarización de la señal de entrada. Está es una propiedad muy importante para este trabajo de tesis, puesto que esta propiedad nos permite conectar interferómetros en serie, sin preocuparnos por el cambio en el estado de polarización de la luz cuando ésta se transmite de un interferómetro a otro.

Capítulo IV

Experimentos

Introducción

En este capítulo trataremos aspectos importantes de este trabajo de tesis. Explicaremos en que consisten los arreglos experimentales, usados en este trabajo, que permitieron entender las características del sistema y marcaron las pautas para el desarrollo de este trabajo.

Se explicará el procesamiento de señales utilizado para calcular los cambios en la birrefringencia de la fibra que forma el lazo del interferómetro de Sagnac, cuando es sometida a cambios de temperatura.

Por último, explicaremos cuales son las condiciones requeridas para implementar la técnica de multiplexado de sensores interferométricos tipo Sagnac, desarrollada en este trabajo de tesis, con base en los experimentos realizados.

IV.1. Metodología Experimental

El objetivo principal de este trabajo de tesis es investigar una técnica de multiplexado de sensores en serie basados en la técnica de baja coherencia y además estimar cual es el número máximo de sensores que es posible colocar en un sistema. Para esto se inició con un arreglo experimental (figura 20) formado por un láser sintonizable de la marca New Focus modelo Velocity 6328. Las características más importantes son: resolución espectral de barrido de longitud de onda de 0.02nm, la potencia de salida puede seleccionarse desde 1mW a 20mW, la velocidad de barrido del láser puede seleccionarse de 1nm/s a 20nm/s, el rango de longitudes de onda de barrido abarca desde 1520nm a

1570nm. Se utilizaron acopladores de fibra óptica 50/50 para 1550nm de la marca GOULD Fiber Optics modelo 12234200. En arreglos con más de un sensor se utilizaron circuladores de fibra óptica insensibles a la polarización de la marca AC Photonics Inc, modelo PIOC415A1100. La fibra que forma el lazo de Sagnac es una fibra altamente birrefringente HBF por sus siglas en inglés (high birrefringence fiber optic), tipo corbata de moño de la marca NEWPORT modelo F-SPPC-15, sus características son longitud de onda de operación de 1550nm, longitud de onda de corte de $1515\text{nm} \pm 125\text{ nm}$, apertura numérica de 0.11 a 0.13, el perfil de índice de refracción es escalonado y la atenuación de la fibra es de 2dB/km. Se utilizó un fotodetector de la marca THORLABS modelo DET310 sensible al rango de longitudes de onda 700-1700nm con responsividad de 0.9 alrededor de los 1550nm, área activa de detección 3.6x3.6 mm y tiempo de respuesta de 5ns. El osciloscopio utilizado en los experimentos con uno y dos sensores es de la marca Tektroniks modelo TDS430a, sus características más importantes son dos entradas analógicas, impedancia de entrada de $1M\Omega$, capacidad de buffer de $1kS/s$ para un periodo de 2.5s en la adquisición de datos y bus de conexión con computadora por puerto GPIB. La tarjeta de adquisición de datos utilizada en los experimentos con dos, tres y cinco sensores, es de la marca National Instruments modelo NI-6009. Sus características más importantes son 8 entradas analógicas simples y 4 diferenciales con resolución de 14 bits, rango de ± 1 a $\pm 20V$, muestreo máximo de 48kS/s, impedancia de entrada de $144\text{ k}\Omega$ y bus de conexión con computadora por puerto USB.

Como mencionamos en el capítulo II el uso de la técnica de baja coherencia con un láser sintonizable puede variar según el equipo con el que se cuente y el rango de longitudes de onda con las que se desea trabajar. En nuestro caso la técnica consiste en mantener la potencia del láser constante, hacer un barrido de una longitud de onda inicial $\lambda_{inicial} = 1520\text{nm}$ a una longitud de onda final $\lambda_{final} = 1570\text{nm}$, en un periodo de tiempo $T = 2.5\text{s}$ determinado por la velocidad de barrido del láser. Todo esto en sincronía con la adquisición de datos a la salida del fotodetector para capturar la señal de salida del interferómetro en respuesta a la longitud de onda de entrada. Todos los instrumentos tales como láser sintonizable y osciloscopio o tarjeta de adquisición de datos, son controlados

por una computadora con la finalidad de sincronizar el experimento y automatizar las mediciones utilizando como herramienta de programación MATLAB, haciendo uso de los puertos USB y GPIB.

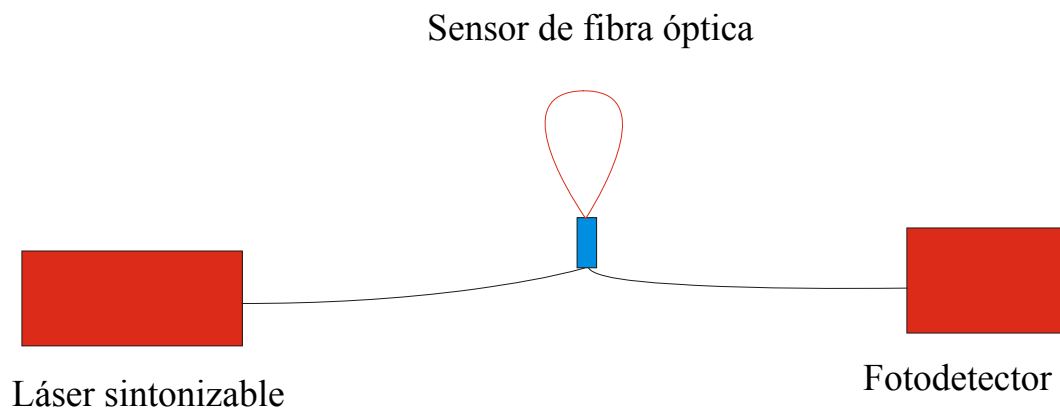


Figura 20. Sensor interferométrico utilizando un láser sintonizable.

Una vez que nuestro sistema funcionó para un sensor, se procedió a agregar más sensores uno por uno, hasta alcanzar en el arreglo experimental un número de cinco sensores en serie (figura 21). Al mismo tiempo, conforme se agregaron sensores al sistema, se diseñaron los programas de procesamiento de señales que se requieren para interrogar a cada sensor del sistema.

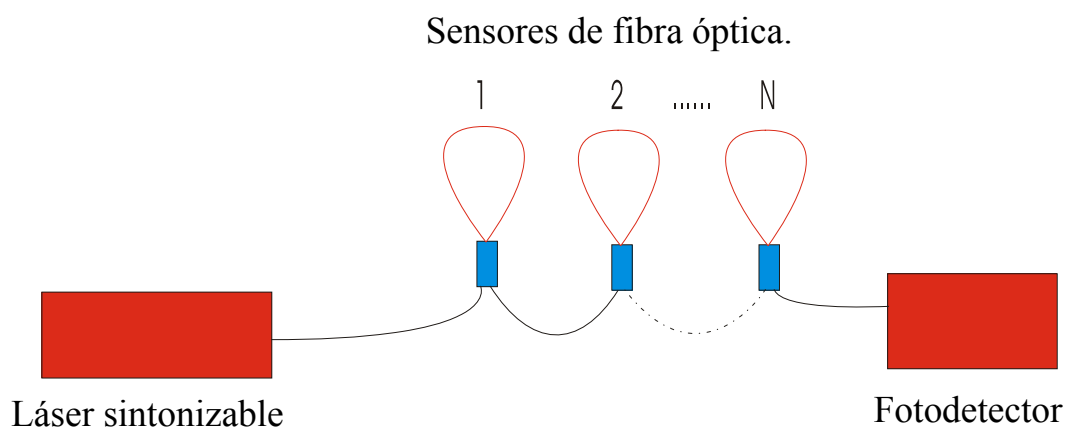


Figura 21. Esquema de multiplexado en serie.

IV.2. Experimento con un interferómetro de Sagnac

El objetivo principal de este experimento es verificar si nuestro sistema de adquisición de datos funciona satisfactoriamente al utilizar un solo interferómetro. Además con este mismo arreglo experimental se caracterizó la birrefringencia de la fibra HBF con la que se forma el lazo de Sagnac. El arreglo utilizado en este experimento es formado por una fuente de luz láser sintonizable, un objetivo de microscopio de 10x utilizado para acoplar la luz a la fibra óptica, un interferómetro de Sagnac. Este interferómetro está formado por un acoplador de fibra óptica de 50/50 con lazo de fibra birrefringente (HBF) como elemento sensor de longitud de 1.4m. Además se utilizó un fotodetector el cual convierte las variaciones de intensidad a variaciones de voltaje, un osciloscopio para la adquisición de datos y por último una computadora, la cual se conecta al láser sintonizable y al osciloscopio con el propósito de sincronizar el experimento y realizar el procesamiento de señales. En la figura 22 se muestra el sistema antes mencionado.

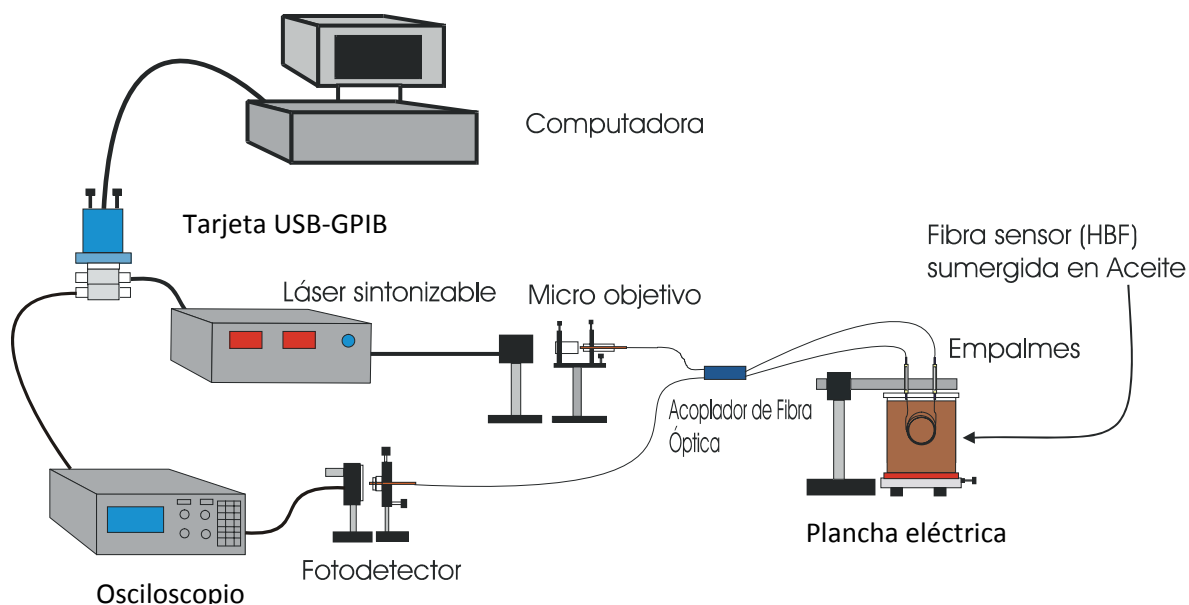


Figura 22. Arreglo experimental con un interferómetro.

En este experimento se utilizó un interferómetro de Sagnac cuyo lazo es formado por una sección de fibra birrefringente de 1.4m. Está misma sección de fibra birrefringente es la sección que se sumerge en aceite para ser sometida a cambios de temperatura.

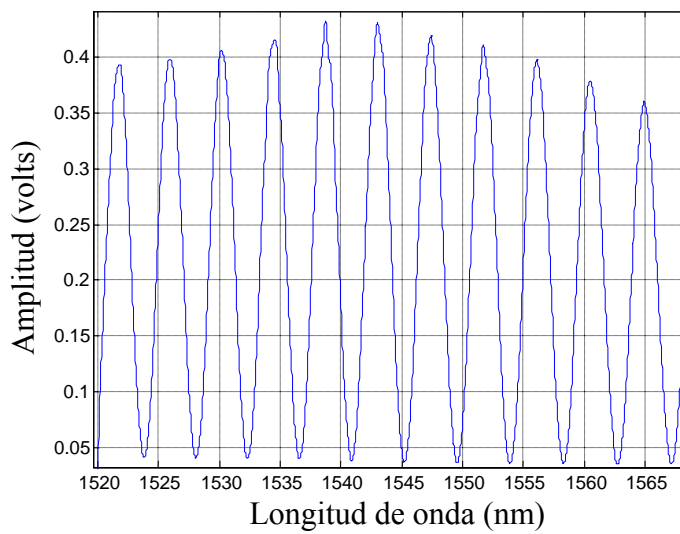


Figura 23. Señal de salida de arreglo experimental.

En la figura 23 se muestra la señal de salida del arreglo experimental en donde podemos apreciar que el barrido del láser sintonizable se encuentra en el rango de 1520nm a 1570nm, como se mencionó en la metodología de los experimentos. En el siguiente tema se describirá el procesamiento de señales que se emplea para obtener la diferencia de camino óptico ΔnL del sensor colocado en arreglo experimental.

IV.2.1 Procesado de señales

En la figura 24 se muestra el esquema de procesado de señales con el que se determina la diferencia de camino óptico ΔnL para un sensor. Es preciso mencionar que el procesado de señales se realiza cada vez que se adquiere una señal.

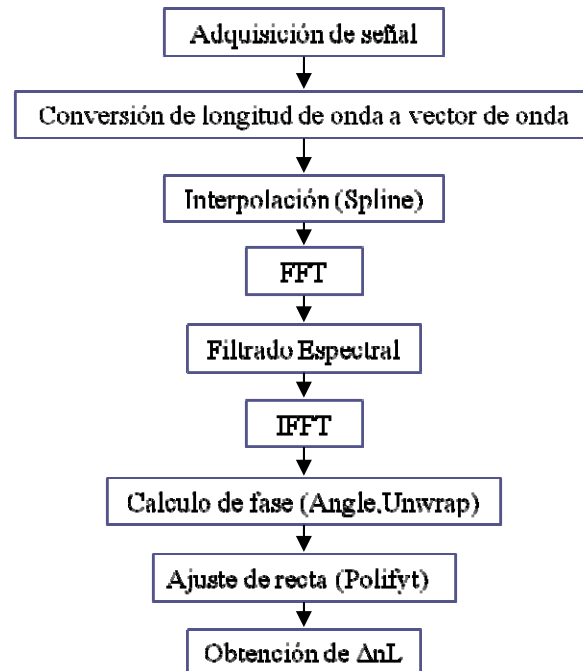


Figura 24. Esquema de programa de procesamiento de señales.

A continuación se describirá en que consiste cada uno de los bloques que conforman el procesado de señales.

Adquisición de señal

La adquisición de la señal requiere de la sincronización del experimento. Se sincroniza el barrido del láser con la adquisición de datos del osciloscopio o tarjeta de adquisición de datos, para guardar las señales de respuesta del sistema en disco duro para su procesado. Esta operación dura un periodo de tiempo de $T = 2.5s$.

En todo experimento es importante cumplir con el teorema de muestreo para capturar datos satisfactoriamente. Este teorema nos dice que la frecuencia de muestreo de un sistema de adquisición de datos debe ser por lo menos dos veces mayor a la frecuencia máxima de la señal que se quiere muestrear.

$$F_s \geq 2F_{\max}, \quad (31)$$

donde F_s es la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición de datos y F_{\max} es la frecuencia máxima que compone la señal a muestrear.

En nuestro caso particular para cumplir con el teorema de muestreo es necesario que se cumpla que:

$$\Lambda \leq 2R_o \leq 2R_e, \quad (32)$$

donde Λ es la separación entre dos máximos del patrón de interferencia dada por la Ec.8, R_o es el ancho de línea espectral del láser sintonizable y R_e es la resolución electrónica dada por la Ec.15.

Conversión de longitud de onda a vector de onda

Este cambio de longitud de onda (λ) a vector de onda (k) es necesario debido a que la función de transmitancia (Ec.28), como función de λ no esta muestreada regularmente. Como se puede observar, λ se encuentra en el denominador del argumento del coseno $\varphi = 2\pi\Delta nL/\lambda$, lo que provoca esta aperiodicidad, en el muestreo.

Para cambiar de longitud de onda a vector de onda k , se genera otro vector para utilizar como eje x utilizando la siguiente ecuación.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (33)$$

El vector de la señal adquirida es rotado para que coincidan con los valores del nuevo eje x que se genero.

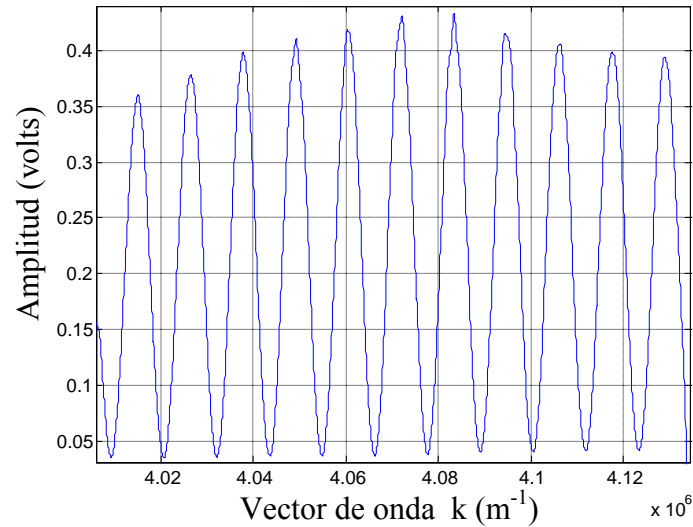


Figura 25. Señal de arreglo experimental convertida a vector de onda k .

Interpolación tipo spline

Hasta este momento la señal procesada sigue siendo una función muestreada irregularmente. Para eliminar esta aperiodicidad en el muestreo se genera una nueva señal a partir de la señal original utilizando interpolación tipo spline. En otras palabras, se generan nuevos vectores de amplitud y vector de onda k a partir de la señal original utilizando la función spline de MatLab. Ejemplo: $yy = \text{spline}(x, y, xx)$; donde x y y son los vectores de la señal original, xx es el eje x que se genera artificialmente y yy son los valores que genera spline para cada valor de xx a partir de los valores originales.

La señal resultante de la interpolación tipo spline es una señal periódica, debido a que el espacio entre muestras de la señal es igual para todo el eje de k .

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Se calcula la transformada de Fourier de la señal interpolada para observar las componentes espectrales que forman dicha señal. En la Ec.34 se muestra la transformada de Fourier discreta por sus siglas en inglés (DFT) y la transformada discreta inversa de Fourier, respectivamente.

$$X(m) = \sum_{n=1}^N x(n) \omega_N^{(n-1)(m-1)},$$

$$x(n) = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{m=1}^N X(m) \omega_N^{-(n-1)(m-1)},$$
(34)

donde $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$ y N es la longitud del vector.

Al obtener la transformada de Fourier es posible aplicar filtros en el dominio de la frecuencia para filtrar la señal que se desea procesar. En la figura 24 podemos ver la transformada de Fourier de nuestra señal experimental, donde podemos ver que la componente DC no está presente debido a que artificialmente se restó el promedio de la señal.

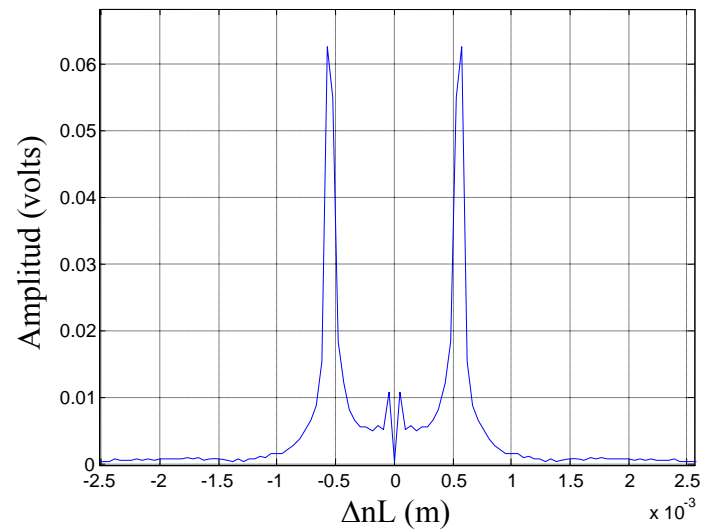


Figura 26. Espectro de Fourier de señal.

Filtrado Espectral

Una vez obtenido el espectro de Fourier de nuestra señal se procede a filtrar la señal. Esto se hace aplicando un filtro pasa-banda en la sección del espectro que nos interesa.

Suponemos que tenemos una señal, cualquiera que sea, sin filtrar que está dada por:

$$y = \cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}, \quad (35)$$

filtramos la señal,

$$y = \frac{e^{i\theta}}{2}. \quad (36)$$

Esto mismo se hace con el espectro de la señal experimental, con lo que se facilita el cálculo de fase de la señal al tener solo una exponencial.

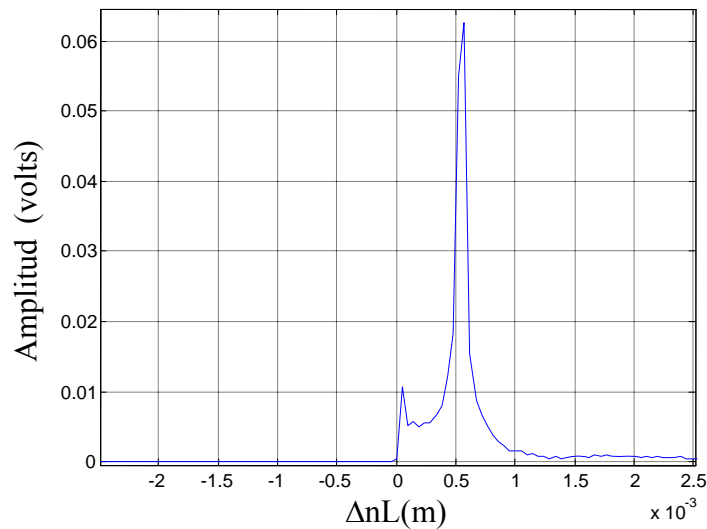


Figura 27. Espectro de Fourier filtrado.

Después de filtrar la señal, se toma el espectro de la señal filtrada y se calcula su transformada inversa de Fourier.

Obtención de ΔnL

Una vez obtenida la señal ya filtrada, se calcula la fase de la señal resultante. Para esto se utiliza la función `Angle` de MatLab, la cual denota $\arctan(\text{imag}(yy)/\text{real}(yy))$ en donde (yy) es la señal filtrada. Una vez obtenida la fase de la señal, se utiliza la función `unwrap` para que la fase de la señal sea representada de una forma creciente. Se calcula la recta que mejor se ajusta a la fase de la señal. Esta fase obtenida corresponde al valor de $\varphi = \Delta nL$, de esta manera podemos observar los cambios que sufre la diferencia de camino óptico ΔnL , al someter nuestro lazo de Sagnac a perturbaciones externas. Estas perturbaciones pueden ser temperatura, presión, humedad, esfuerzos entre otras.

La dependencia de temperatura de ΔnL está caracterizada por la Ec. 37.

$$DCO = \Delta nL = \beta L(T_o - T^o), \quad (37)$$

donde $\beta = 3.68 \times 10^{-7}$, $T_o = 1080^\circ C$, L es la longitud de la fibra birrefringente (HBF) y T^o es la temperatura en grados centígrados a la cual es sometida la fibra HBF.

Esta dependencia de temperatura se determinó experimentalmente al caracterizar ΔnL bajo cambios de temperatura. Este experimento se mostrará mas adelante.

IV.2.2. Resultados experimentales

En este experimento se utilizó el esquema mostrado en la figura 22. Se sometió un interferómetro con lazo de fibra birrefringente de longitud de 1.4m a temperatura ambiente.

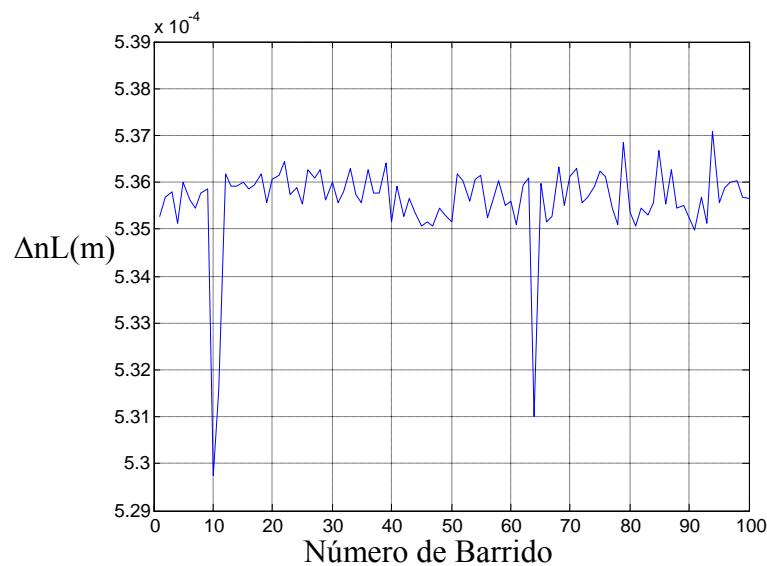


Figura 28. Diferencia de camino óptico (ΔnL) a temperatura ambiente $20^\circ C$.

En la figura 28 se aprecia que al someter la sección de fibra birrefringente a temperatura ambiente, la diferencia de camino óptico (ΔnL) se mantiene relativamente constante a excepción de dos picos que no corresponden a cambios de temperatura. Estos brincos se señalan en la figura 29.

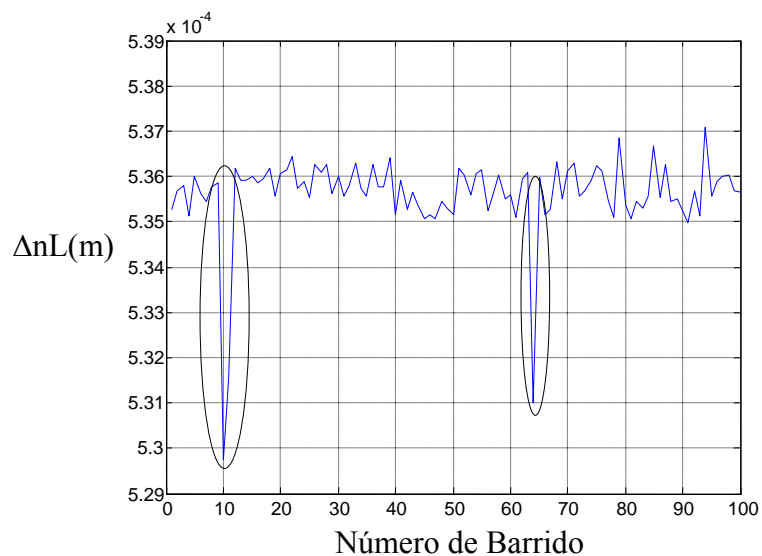


Figura 29. Brincos en cálculo de diferencia de camino óptico ΔnL .

Se realizó un segundo experimento en donde se sometió la sección de fibra birrefringente a cambios de temperatura, mostrados en la figura 30a).

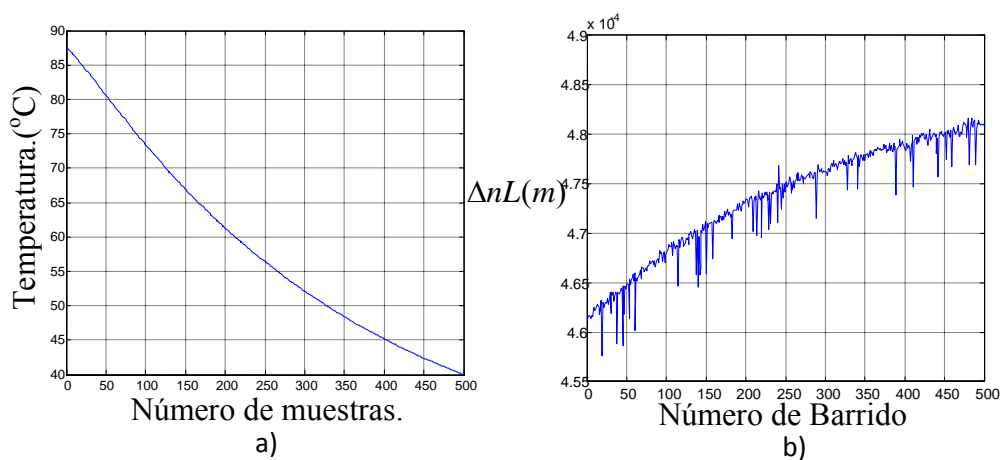


Figura 30. Experimento con temperatura. a) Temperatura aplicada al interferómetro.
b) ΔnL producido por cambios de temperatura.

En la figura 30 observamos que al disminuir la temperatura a la cual es sometido el lazo de Sagnac, la diferencia de camino óptico (ΔnL) de la fibra aumenta (figura 30b)). Sin embargo de esta misma gráfica observamos que al igual que en el experimento anterior existen brincos o picos en la diferencia de camino óptico ΔnL que no concuerdan con los cambios de temperatura. Estos brincos se señalan en la figura 31.

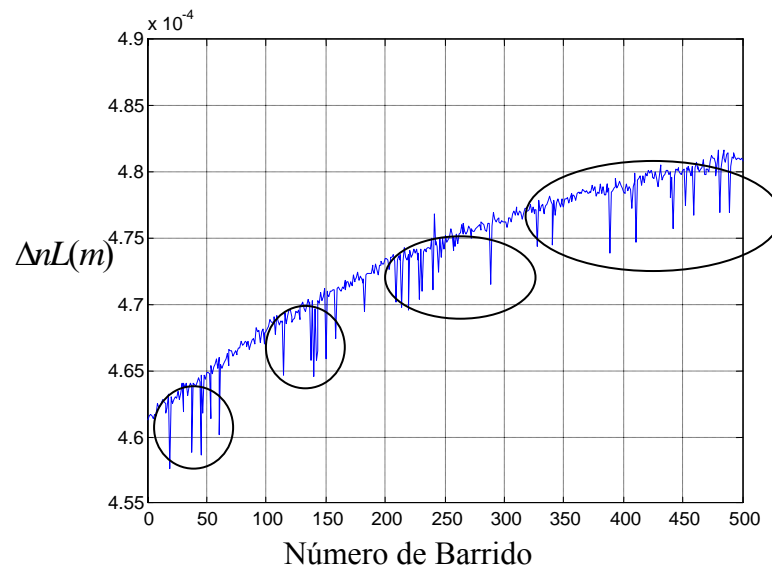


Figura 31. Brincos en cálculo de diferencia de camino óptico ΔnL .

Para investigar este problema se propone un esquema con dos interferómetros el cual será presentado en la siguiente sección.

IV.3. Experimento con dos interferómetros de Sagnac

El objetivo principal de este experimento consistió en investigar si los brincos en el cálculo de ΔnL , que se obtuvieron en el experimento anterior, son ocasionados por inestabilidad en el sistema de arreglo experimental. Para investigar esto se colocaron dos interferómetros en serie. Si los brincos de fase son ocasionados por inestabilidad del sistema, ya sea inestabilidad en el barrido del láser u ocasionales fallas de sincronización, los dos interferómetros presentarán estos brincos simultáneamente.

El arreglo utilizado en este experimento está formado por una fuente de luz láser sintonizable, un objetivo de microscopio de 10x utilizado para acoplar la luz a la fibra óptica, dos interferómetros de Sagnac. Los interferómetros están formados por acopladores de fibra óptica 50/50 y un lazo de fibra birrefringente (HBF) como elemento sensor. Las longitudes de los lazos fueron de 2.1 y 6.3m, el primero de ellos se utilizó como interferómetro de compensación para suprimir las inestabilidades en el sistema y el otro como sensor de temperatura. Además se utilizó un circulador de fibra óptica en medio de los dos interferómetros para evitar retornos de luz del segundo interferómetro al primero; se utilizó un fotodetector el cual convierte las variaciones de intensidad a variaciones de voltaje, un osciloscopio para convertir la señal analógica en una señal digital y por último una computadora, la cual se conecta al láser sintonizable y al osciloscopio con el propósito de sincronizar el experimento y realizar el procesamiento de señales.

En el arreglo experimental que se muestra en la figura 32 se colocó un circulador de fibra óptica en medio de dos interferómetros de Sagnac. Este circulador de fibra óptica tiene la finalidad de evitar que la potencia óptica que es reflejada del segundo interferómetro de Sagnac, pase nuevamente por el primer interferómetro. Esto con el propósito de evitar múltiples reflexiones las cuales ocasionan que se generen nuevas componentes parásitas en el espectro de Fourier. Estas reflexiones se muestran en el esquema de la figura 33.

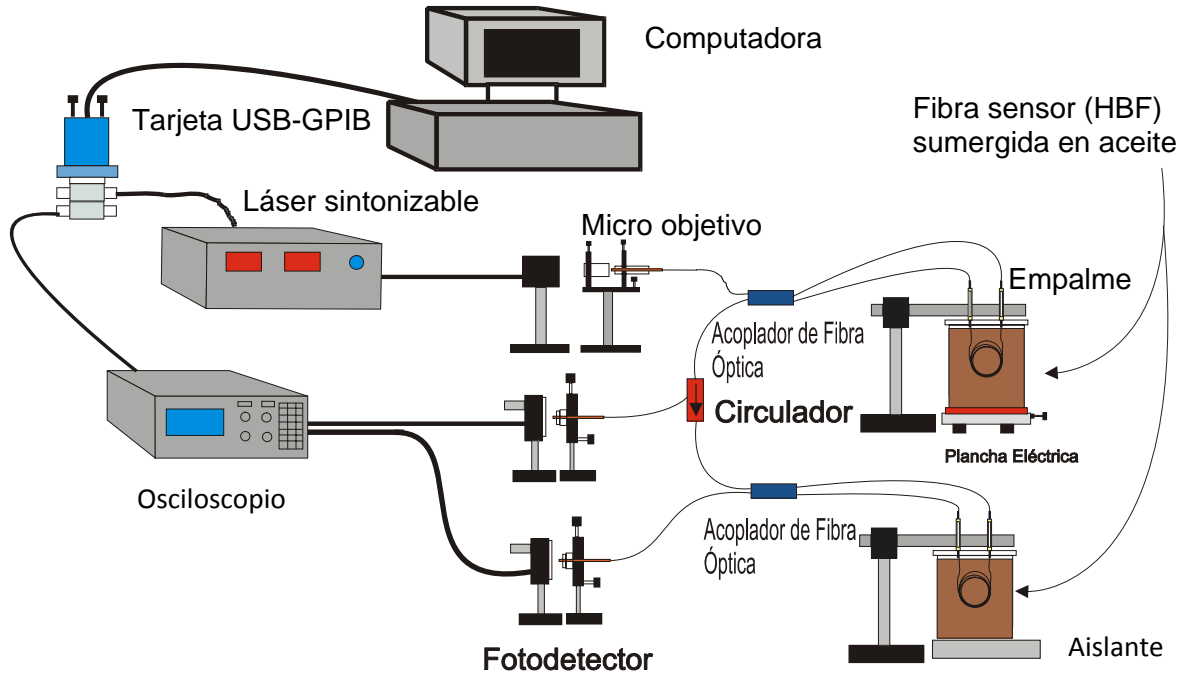


Figura 32. Arreglo experimental con dos interferómetros.

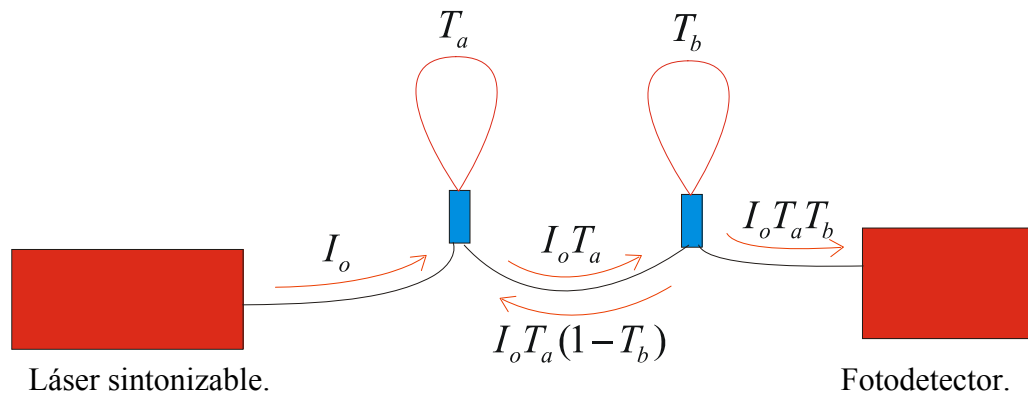


Figura 33. Esquema de flujo de señales.

En la figura 33 se muestra como una intensidad de entrada se ve afectada por la transmitancia de cada interferómetro por los cuales pasa la luz. Debido a que se presentan varias reflexiones entre los dos interferómetros, es necesario colocar un circulador de fibra óptica como mencionamos anteriormente. El objetivo de dicho circulador es el de permitir que la luz circule solo en una dirección. Cuando la luz regresa en dirección contraria es

desviada para que esta se propague por otra fibra o puerto de salida del mismo circulador, evitando de esta manera que la luz que regresa del segundo interferómetro modifique la transmitancia del primer interferómetro al repetir estas reflexiones varias veces. Lo cual provoca que de tener una señal de salida representada por la Ec. 38, se tiene una señal de salida que está representada por la Ec. 39. Estas reflexiones son originadas por la naturaleza misma del interferómetro y dependen del coeficiente de acoplamiento de los acopladores de fibra óptica. Si se tiene un acoplador de fibra óptica con razón de acoplamiento de 50/50, la mitad de la intensidad de entrada será transmitida siendo afectada por la transmitancia del interferómetro y la otra mitad de la intensidad será reflejada siendo esta afectada por la reflectancia del mismo interferómetro.

$$I_s = I_o T_a T_b = I_o \left[\left(1 - 2\alpha(1-\alpha) \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_1 L_1 \right) \right) \right) \left(1 - 2\alpha(1-\alpha) \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_2 L_2 \right) \right) \right) \right], \quad (38)$$

$$I_s = I_o T_f = I_o \left[\frac{T_a T_b}{(1 - \sqrt{(1-T_a)(1-T_b)}) \cos(ndk) + (1-T_a)(1-T_b)} \right], \quad (39)$$

donde el término $\cos(ndk)$ es un término que oscila muy rápido y no es posible detectar, debido a esto la Ec.39 queda de la siguiente manera

$$I_s = I_o T_f = I_o \left[\frac{T_a T_b}{(1 + (1-T_a)(1-T_b))} \right]. \quad (40)$$

La señal de salida del arreglo experimental que se muestra en la figura 28, es generada por la multiplicación de la función de transmitancias de los dos interferómetros y

la intensidad de entrada. Debido a la incorporación del circulador de fibra óptica es posible tener una segunda señal de salida, la cual es generada por la transmitancia del primer interferómetro y la reflectancia del segundo interferómetro. En la figura 34 se muestra mediante un diagrama más sencillo el flujo de señales del arreglo experimental.

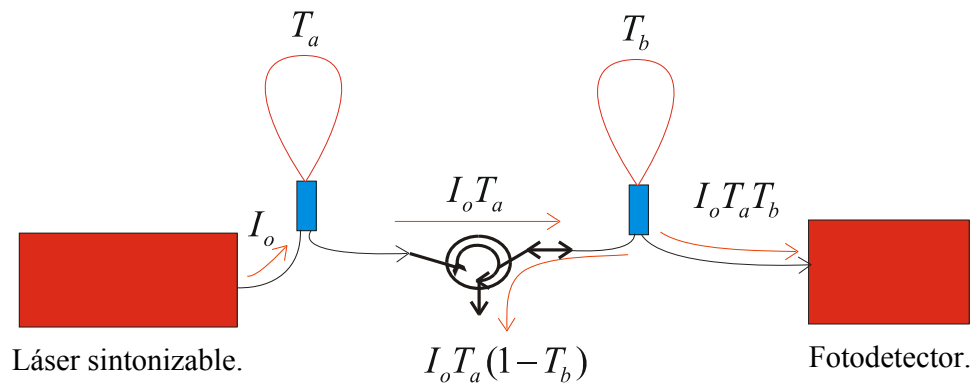


Figura 34. Esquema de flujo de señales de arreglo experimental con un circulador colocado entre dos interferómetros.

La señal del arreglo experimental que sale por el segundo interferómetro se muestra en la figura 35a) y la señal que sale a través del circulador de fibra óptica se muestra en la figura 35b). Dichas señales serán nombradas como señal de salida serie y señal de salida circulador, respectivamente.

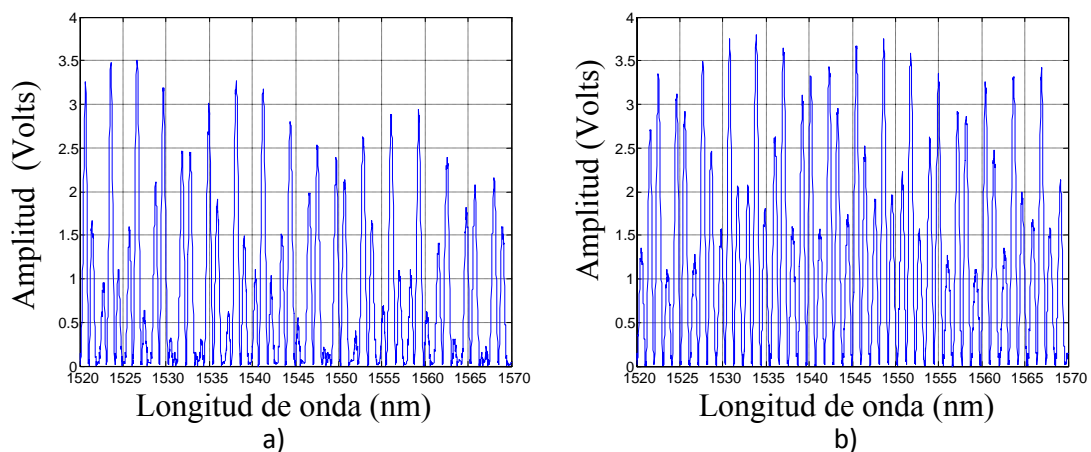


Figura 35. a) Señal de salida serie de arreglo experimental. b) Señal de salida circulador de arreglo experimental.

Estas dos señales de salida pueden ser utilizadas de igual manera para el procesamiento de señales sin ningún problema. Cualquiera de estas que sea utilizada arrojará los mismos resultados de procesamiento debido a que prácticamente son la misma señal solo que la componente generada por el segundo interferómetro está en contrafase con una de estas señales. Como se mencionó, la señal de salida serie se genera al multiplicarse la intensidad de entrada por la transmitancia de los dos interferómetros, por otra parte la señal de salida circulador se genera al multiplicar la intensidad de entrada por la transmitancia del primer interferómetro y la reflectancia del segundo interferómetro.

Cuando se colocan dos interferómetros en serie es importante seleccionar las longitudes de las fibras que forman el lazo de cada interferómetro de tal manera que las componentes parásitas en el espectro de Fourier no interfieran con las componentes fundamentales. Para esto es necesario seleccionar las longitudes de las fibras de forma tal que su cociente sea un múltiplo de 3. Por ejemplo si el primer interferómetro está formado por un lazo de fibra birrefringente de longitud de 2m, el otro interferómetro deberá formar un lazo con una fibra de 6m. Debido a esto se seleccionaron lazos de fibra birrefringentes de 2.1m y 6.3m en este experimento.

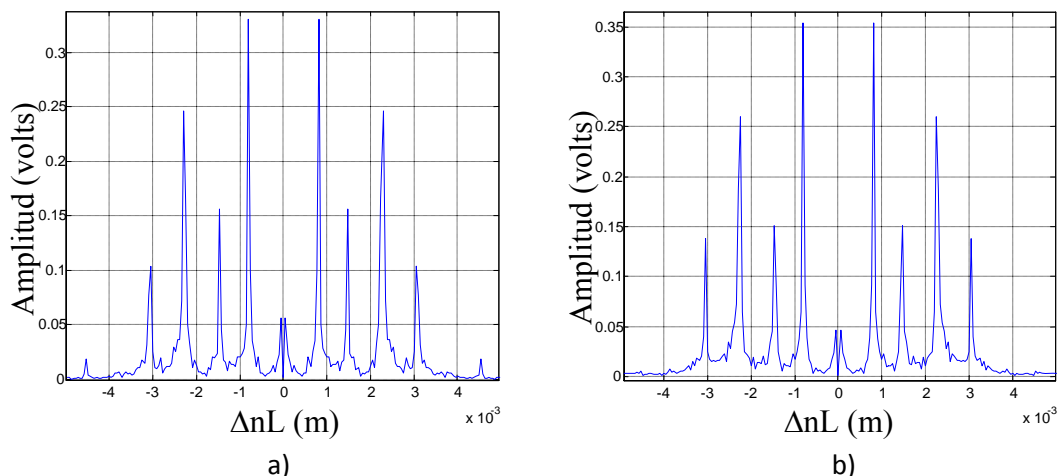


Figura 36. Espectro de Fourier de dos sensores en serie de longitudes de 2 y 6 metros.
a) Sin circulador entre los sensores. b) Con circulador entre los sensores.

IV.3.1 Procesado de señales

Para este experimento el procesado de señales es el mismo que se utiliza para un solo interferómetro. Con algunas consideraciones en la adquisición de señal y algunas diferencias en el filtrado espectral.

Adquisición de la señal

Como mencionamos anterior mente en el experimento con un sensor, es necesario que se cumpla con el teorema de muestreo para adquirir la señal satisfactoriamente. Al agregar otro sensor al sistema es necesario que se cumpla con la siguiente condición:

$$\Lambda_{\min} \leq 2R_o \leq 2R_e, \quad (41)$$

donde Λ_{\min} es la separación entre dos máximos del patrón de interferencia generado por el sensor el cual es formado por la HBF de mayor longitud; R_o es el ancho de línea del láser sintonizable y R_e es la resolución electrónica dada por la Ec.15.

Sabiendo esto podemos decir que la longitud máxima de fibra HBF que se puede utilizar para formar un sensor está dada por la siguiente ecuación:

$$L_{S\max} = \frac{(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})}{2R_o(\beta(T_o - T))}, \quad (42)$$

Filtrado Espectral

Al colocar dos sensores en serie se tiene en el espectro de Fourier las frecuencias fundamentales de cada sensor, además de frecuencias parásitas originadas por la suma y resta de las frecuencias fundamentales. Esto se muestra en la figura 36 en donde los picos máximos corresponden a las frecuencias fundamentales de su respectivo interferómetro y los picos más pequeños corresponden a la suma y resta en frecuencia de los picos fundamentales.

En este esquema de dos interferómetros en serie, solamente se selecciona la componente fundamental del interferómetro que se quiere interrogar y se filtra para posteriormente realizar el mismo procesado mostrado en la sección IV.2.1.

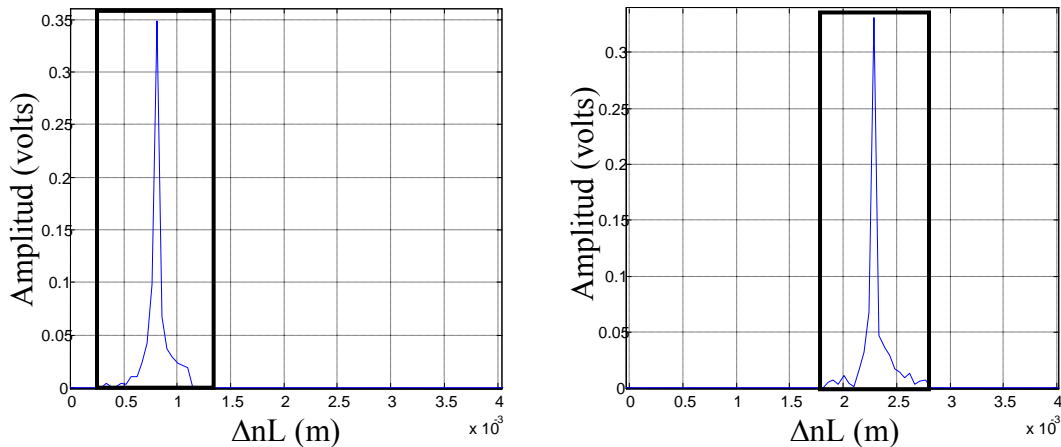


Figura 37. Filtrado espectral de componentes fundamentales de Sensores.

IV.3.2. Resultados experimentales

En este experimento se utilizó el esquema mostrado en la figura 32, en el cual se utilizaron dos interferómetros con lazos de fibra birrefringente como elemento sensor con longitudes de 2.1m y 6.3m. Se sometió el interferómetro de lazo de longitud de fibra birrefringente de 6.3m a cambios de temperatura en un rango de 88 a 40°C como se muestra en la figura 38d).

En la figura 38a) se muestra la diferencia de camino óptico ΔnL para el interferómetro de 2.1m cuando se somete a 22°C. En la figura 38b) observamos ΔnL para el interferómetro de 6.3m, el cual fue sometido a los cambios de temperatura mostrados en la figura 38d). Regresando a la figura 38b), observamos que aumenta ΔnL debido a que los esfuerzos mecánicos dentro de la fibra aumentan al disminuir la temperatura. En las figuras 38a) y 38b) podemos apreciar que se tienen los mismos brinco en ambos interferómetros. Sabiendo esto es posible compensar estas inestabilidades al utilizar uno de los

interferómetros como referencia, para calcular la razón entre ellos. Al hacer esto observamos que los brincos prácticamente desaparecen como podemos apreciar en la figura 38c). Siendo este un posible método de compensación para este tipo de sistemas de baja coherencia.

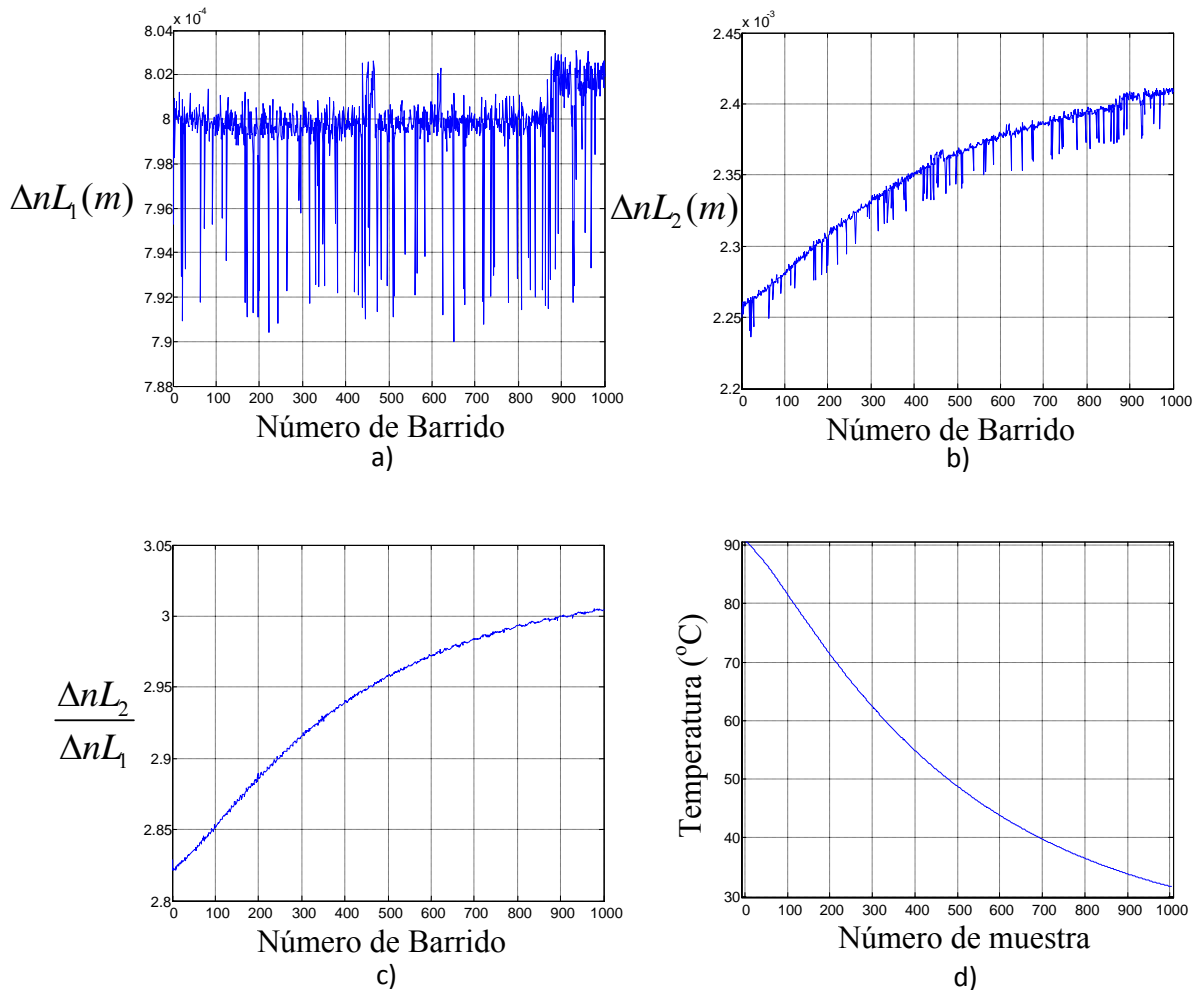


Figura 38. a) Diferencia de camino óptico ΔnL del interferómetro de 2.1m a $22^{\circ}C$. b) Diferencia de camino óptico ΔnL del interferómetro de 6.3m. c) Razón entre interferómetros. d) Temperatura aplicada a interferómetro de 6.3m.

Se realizó un segundo experimento en donde se remplazó al osciloscopio por una tarjeta de adquisición de datos. Se mantuvieron los dos sensores a temperatura ambiente para observar como influye la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición de datos. Para esto la señal fue muestreada a 1kS/s y 5kS/s.

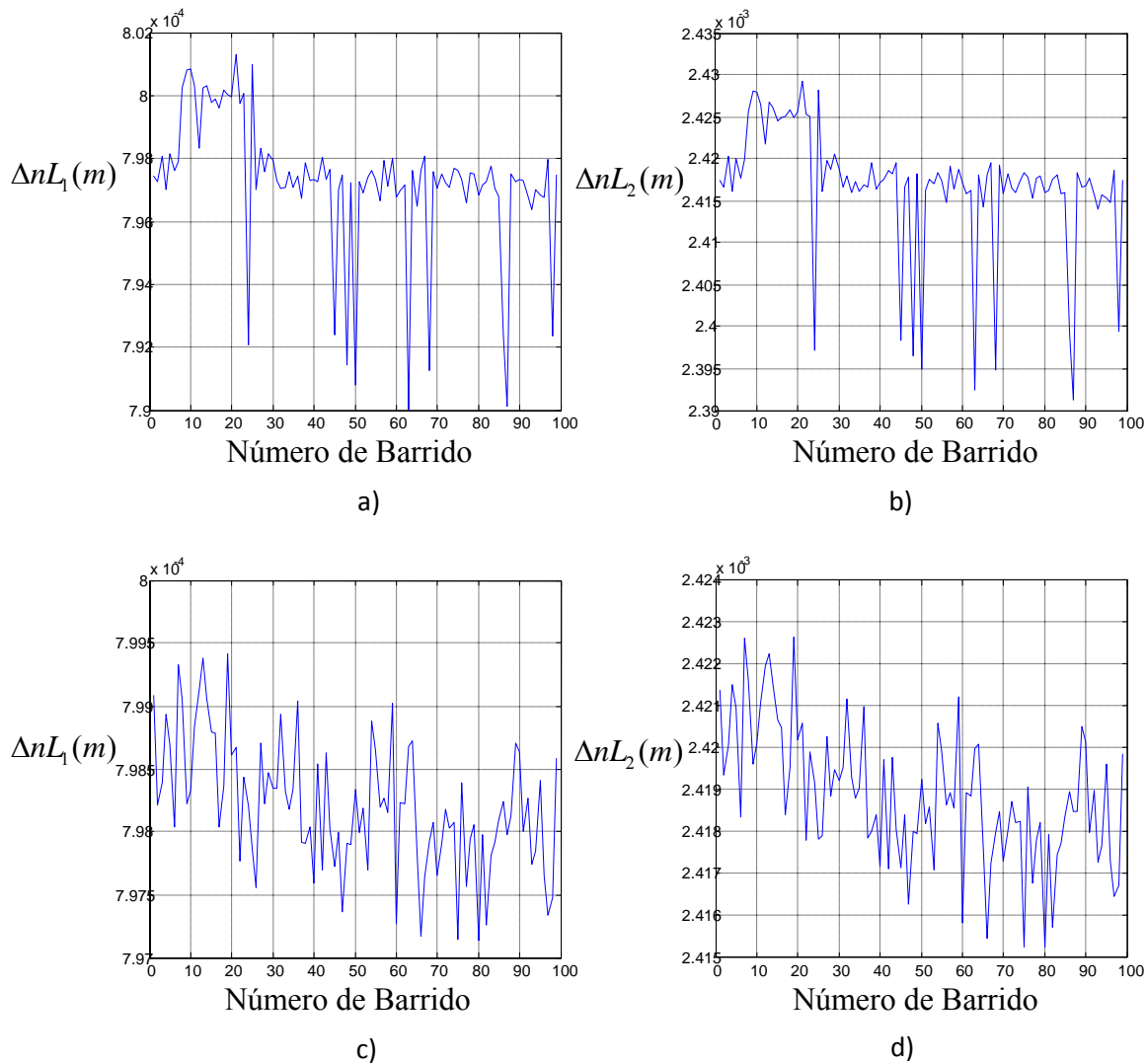


Figure 39. Diferencia de camino óptico a temperatura ambiente de: a) Interferómetro de 2.1m, muestreo de 1kS/s. b) Interferómetro de 6.3m, muestreo de 1kS/s. c) Interferómetro de 2.1m, muestreo de 5kS/s. d) Interferómetro de 6.3m, muestreo de 5kS/s.

En la figura 39a,b), se observa que se presentan los mismos brincos en los dos interferómetros. Esto sucede a pesar que los interferómetros son colocados en recipientes diferentes.

En la figura 39c,d), se observa que los brincos son de menor magnitud en comparación con los brincos mostrados en la figura 39a,b). Con lo que podemos decir que al aumentar el muestreo del sistema, se disminuye la inestabilidad en el mismo. Sin embargo, al aumentar el muestreo no eliminamos por completo los brincos de fase, por lo que sigue siendo necesario utilizar un interferómetro de referencia para compensar los brincos de fase inducidos por el sistema. Estos brincos de fase pueden ser ocasionados por inestabilidad en el barrido de láser sintonizable, pequeñas fallas en sincronía y muestreo del sistema.

Cabe mencionar que para poder lograr buenas mediciones de temperatura, es necesario que el interferómetro de referencia sea colocado en un ambiente controlado a una temperatura constante y contar con una buena calibración del sistema.

Existen trabajos en donde utilizan interferómetros de Sagnac para filtrar señales en comunicaciones, formados por fibras birrefringentes fónicas (D.H.Kim y J.U.Kang, 2004). Con este tipo de fibras el interferómetro de Sagnac se hace virtualmente insensible a la temperatura, lo que podría ser aprovechado como interferómetro de referencia. Sin embargo el objetivo de este trabajo de tesis es investigar una técnica de multiplexado de sensores en serie y desarrollar el método de interrogación de sensores. Por esta razón, se continuarán los experimentos sin enfocarnos en la exactitud en la medición de temperatura. Sino que bastará con que los interferómetros respondan de una manera lineal a las perturbaciones de temperatura de manera que se muestre que se interroga satisfactoriamente a los sensores que forman el sistema.

IV.4. Experimento con tres interferómetros de Sagnac

Sabemos que al utilizar el esquema donde se colocan interferómetros con fibras HBF con longitudes múltiplos de tres, se tiene una diferencia en sensibilidad entre el interferómetro formado por la HBF de mayor longitud y la HBF de menor longitud. Lo cual es un inconveniente enorme pues en sistemas de sensores, se busca que todos los sensores del sistema tengan sensibilidad parecida o igual. Además otro inconveniente es que al utilizar este esquema se tiene que al final del sistema de sensores se requiere de fibras excesivamente largas. Debido a esto, es indispensable utilizar otro esquema alternativo a este.

En sistemas donde se colocan M sensores en serie, tenemos que el espectro de Fourier de la señal de salida está compuesto por $(3)^M$ componentes espectrales, de las cuales $(3)^M - 2M$ son componentes parásitas que se generan por la suma y resta entre las componentes fundamentales de los M sensores.

En sistemas donde se tienen dos interferómetros en serie, es posible imponer la condición que $(L_{\max} - L_{\min}) < L_{\min}$ donde L_{\max} es la longitud de la fibra HBF de mayor longitud en todo el sistema de sensores y L_{\min} es la longitud de la fibra HBF de menor longitud en todo el sistema de sensores. Al imponer esta condición nos aseguramos que no existan componentes parásitas colocadas en medio de las componentes fundamentales de los sensores del sistema. Sin embargo cuando se emplea esta condición en sistemas de más de dos interferómetros en serie, se tiene que las componentes parásitas originadas por la suma y resta, en donde se involucran ‘todas’ las componentes de los M sensores, siempre se posicionan en medio o cerca de las componentes fundamentales de los sensores del sistema.

El objetivo principal de este experimento es investigar si al implementar la condición de $(L_{\max} - L_{\min}) < L_{\min}$ y haciendo uso de la función logaritmo, aplicándola a la

señal de salida del sistema de sensores, es posible disminuir la amplitud de las componentes parásitas en el espectro de Fourier.

El arreglo utilizado en este experimento es formado por una fuente de luz láser sintonizable, un objetivo de microscopio de 10x utilizado para acoplar la luz a la fibra óptica, tres interferómetros de Sagnac. Estos interferómetros están formados por acopladores de fibra óptica de 50/50 con lazo de fibra birrefringente (HBF) como elemento sensor de longitudes de 6,8 y 10m, uno de los cuales es utilizado como interferómetro de compensación y los dos restantes como sensores de temperatura respectivamente. Además se utilizaron circuladores de fibra óptica en medio de los interferómetros, un fotodetector el cual convierte las variaciones de intensidad a variaciones de voltaje, una tarjeta de adquisición de datos para convertir de una señal analógica a digital y por último una computadora la cual se conecta al láser sintonizable y a la tarjeta de adquisición de datos con el propósito de sincronizar el experimento y realizar el procesado de señales.

En el arreglo experimental que se muestra en la figura 40, se puede apreciar que se colocaron circuladores de fibra óptica con el propósito de evitar que la luz que es reflejada por cada interferómetro regrese al anterior como se explicó en la sección anterior. Otra razón por la cual se utilizaron circuladores de fibra óptica es que es más fácil encontrar fallas en el experimento en caso de que un conector o empalme no funcionase correctamente. Debido a que al trabajar con circuladores es posible ver la señal que es reflejada por el interferómetro que se encuentra delante del circulador de fibra óptica y de esta manera verificar que el interferómetro trabaja correctamente. Esto es de mucha utilidad cuando no se tiene señal de salida y es necesario verificar en donde se encuentra la falla del sistema. En la figura 41 se muestra el arreglo experimental y su flujo de señales.

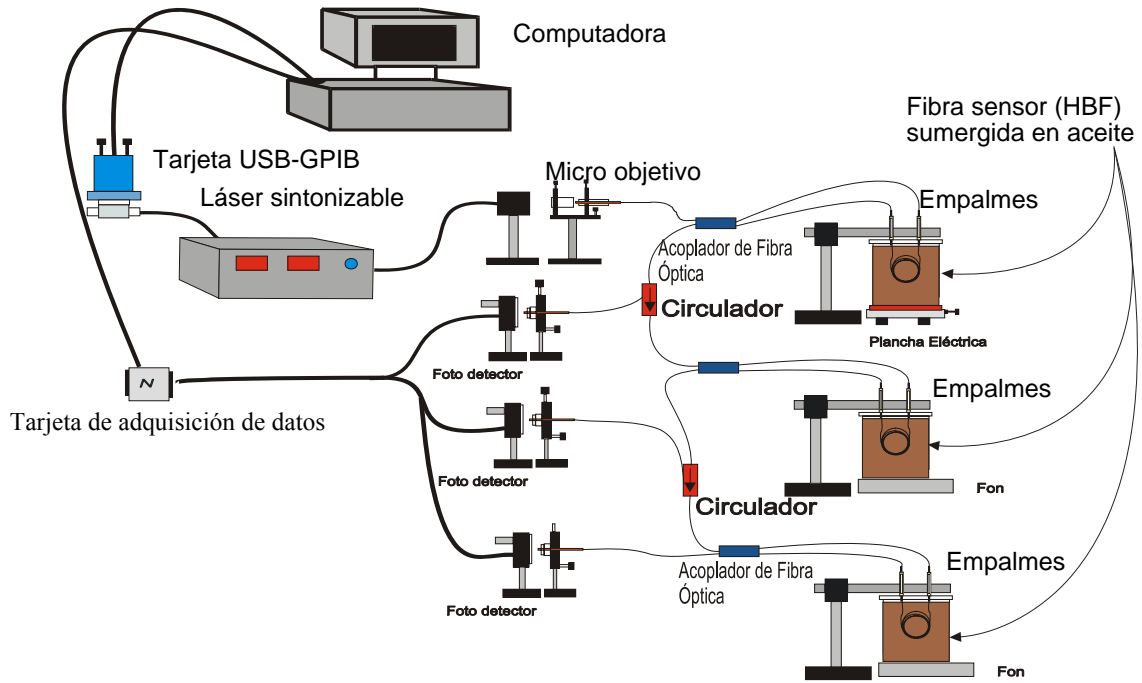


Figura 40. Arreglo experimental con tres interferómetros.

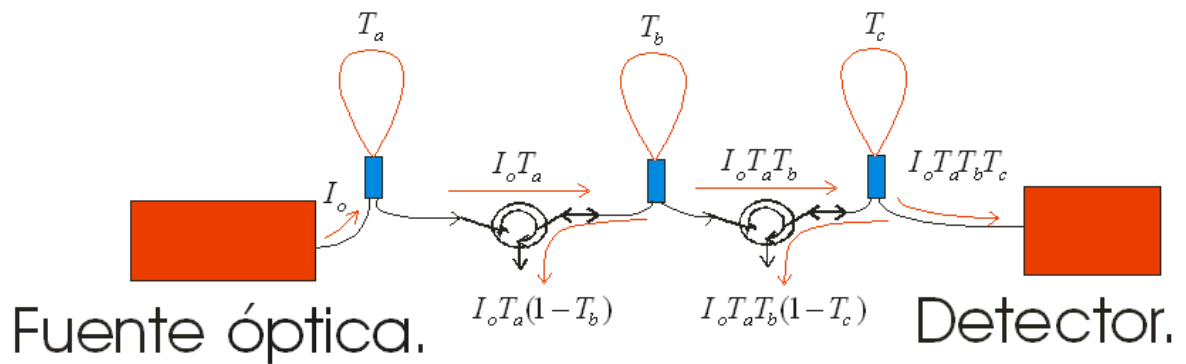


Figura 41. Esquema de flujo de señales de arreglo experimental.

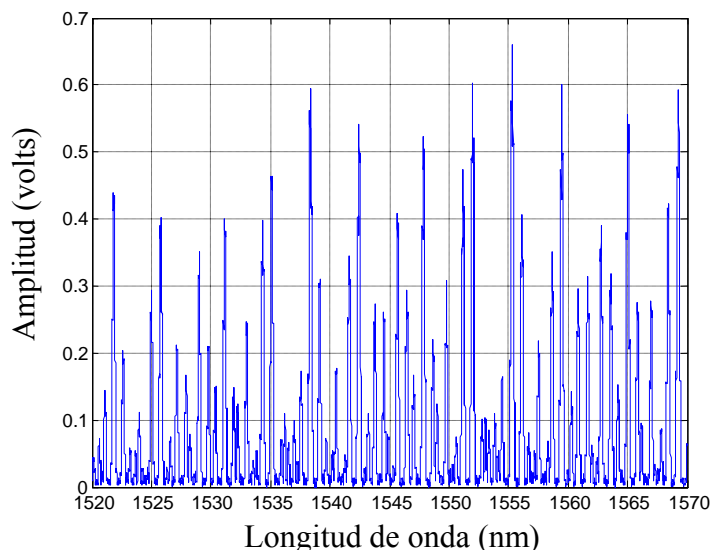


Figura 42. Señal de salida de arreglo experimental.

IV.4.1 Procesado de señales

Para este arreglo experimental fue necesario escoger cuidadosamente las longitudes de las fibras que forman los lazos de cada interferómetro, debido a que el resultado del procesado de señales depende fuertemente de la selección de los valores de longitud de fibras birrefringentes. Para escoger de una manera adecuada las longitudes de las fibras, es necesario hacer una serie de consideraciones las cuales se presentan a continuación.

Primero se selecciona un valor de longitud de la fibra birrefringente para el sensor de mayor longitud, que no sea mayor a $L_{S_{max}}$. Se estima el número de periodos que se tendrán al utilizar está longitud de fibra en un interferómetro, se calcula el número de periodos de espaciamento necesario para medir un rango de temperatura sin que exista traslape en el espectro de Fourier entre las componentes de cada sensor, a continuación se estima el número de periodos para el sensor con longitud de fibra menor, una vez obtenidos estos dos parámetros se estima el número de sensores que es posible colocar en serie con base en el número de periodos de espaciamento y por último se determina la longitud de

las HBF que conforman cada interferómetro del sistema. A continuación se muestra como obtener el número de periodos que se tienen en un barrido del láser al tener una fibra birrefringente de determinada longitud.

Si sabemos que:

$$\varphi_{inicial} = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda_{inicial}} = 2\pi q, \quad (42)$$

$$\varphi_{final} = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda_{final}} = 2\pi(q + N_p), \quad (43)$$

donde q es entero, L es la longitud de la fibra birrefringente, Δn es la birrefringencia de la fibra y N_p es el número de periodos. Si hacemos la resta entre la Ec.42 y Ec.43 tenemos que:

$$N_p = \frac{\Delta nL\Delta\lambda}{(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})}, \quad (44)$$

donde ΔnL determina el valor de T_{min}^o a la cual será sometido el sensor.

Una vez que se tiene el número de periodos para la longitud de fibra más larga, se determina el número de periodos de espaciamento (P_e) necesarios para que no exista interferencia entre las componentes espectrales de un sensor y otro. Para esto es necesario considerar el rango dinámico de la variable física que queremos medir. Es posible estimar el número de periodos de espaciamento (P_e) utilizando la siguiente ecuación:

$$P_e = \left(\left(\frac{\beta L (T_{max}^o - T_{min}^o) \Delta\lambda}{(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})} \right) + 2 \right), \quad (45)$$

donde T_{max}^o y T_{min}^o son las temperaturas máxima y mínima, respectivamente.

En otras palabras si se quiere medir un rango de temperatura de T_{\max}^o a T_{\min}^o , es necesario que exista un espaciamiento de P_e entre los sensores del sistema para que la señal de salida de nuestro sensor tenga la libertad de desplazarse sin traslaparse con las componentes espectrales de los sensores vecinos en el espectro de Fourier.

Una vez determinado P_e es posible calcular el número mínimo de periodos que puede tener el sensor formado por la fibra de menor longitud, para que el sistema funcione correctamente:

$$N_{p\min} = \frac{N_{p\max}}{2} + P_e. \quad (46)$$

Conociendo $N_{p\max}$, $N_{p\min}$ y P_e , podemos calcular el número de sensores que es posible colocar en el sistema de la siguiente manera:

$$N_{p1} = N_{p\max}. \quad (47)$$

Si se cumple la condición $N_{p(n)} \geq N_{p\min}$ entonces podemos agregar otro sensor al sistema de la siguiente manera.

$$N_{p(n+1)} = N_{pn} - P_{en}, \quad (48)$$

$$L_{(n+1)} = \frac{N_{p(n+1)}(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})}{\beta(T_o - T_{\min})\Delta\lambda}, \quad (49)$$

$$P_{e(n+1)} = \left(\left(\frac{\beta L_{(n+1)}(T_{\max}^o - T_{\min}^o)\Delta\lambda}{(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})} \right) + 2 \right), \quad (50)$$

donde n es entero, $n = 1, 2, 3, \dots, (M)$. Este procedimiento se repite hasta que la condición $N_{p(n)} \geq N_{p\min}$ no se cumpla. En ese momento ya no es posible agregar otro sensor al sistema.

Al implementar el procedimiento anterior, tendremos como resultado un sistema formado por tres interferómetros cuyas longitudes de HBF son alrededor de 6m, 8m y 10m.

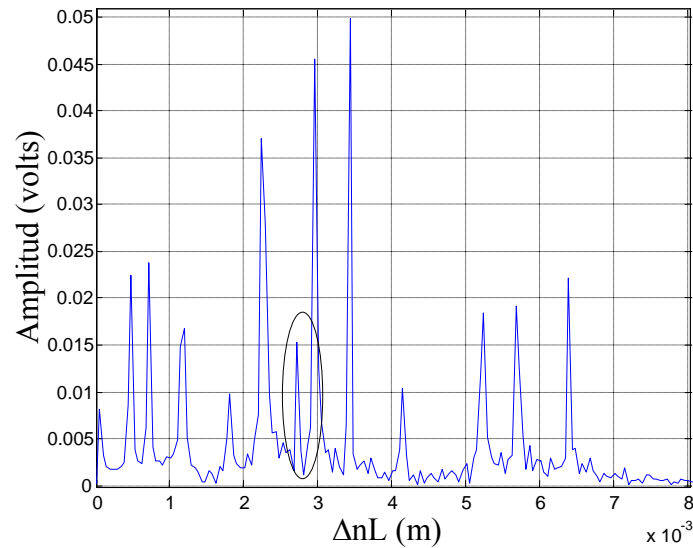


Figura 43. Espectro de señal experimental.

En la figura 43 se observa la parte derecha del espectro de Fourier de la señal experimental, en donde podemos ver que existen tres picos máximos los cuales corresponden a las componentes fundamentales de cada interferómetro. De estas componentes de amplitud máxima la de más alta frecuencia corresponde al interferómetro de lazo con longitud de fibra de 10m, seguida por la componente del interferómetro de longitud de 8m y por último la componente de amplitud máxima de menor frecuencia que corresponde al interferómetro de lazo de 6m. En esta misma gráfica se puede observar un pico parásito señalado con un círculo, el cual se encuentra cerca de uno de los picos

máximos. Este pico máximo corresponde a la componente fundamental del interferómetro, que está formado por una fibra de 8m en su lazo. El pico parásito corresponde a la combinación algebraica de la suma y la resta de frecuencias de los tres interferómetros ($F_{10m} - F_{8m} + F_{6m}$). Además de esta componente parásita existen más que se esconden en las componentes fundamentales pero que de igual manera afectan el resultado del procesamiento de señales. Este problema se solucionó al aplicar la función logaritmo a la señal de salida del arreglo experimental. Después de aplicar esta función vemos que la componente parásita, que está señalada en el espectro de la figura 43, desaparece en el espectro que se muestra en la figura 44.

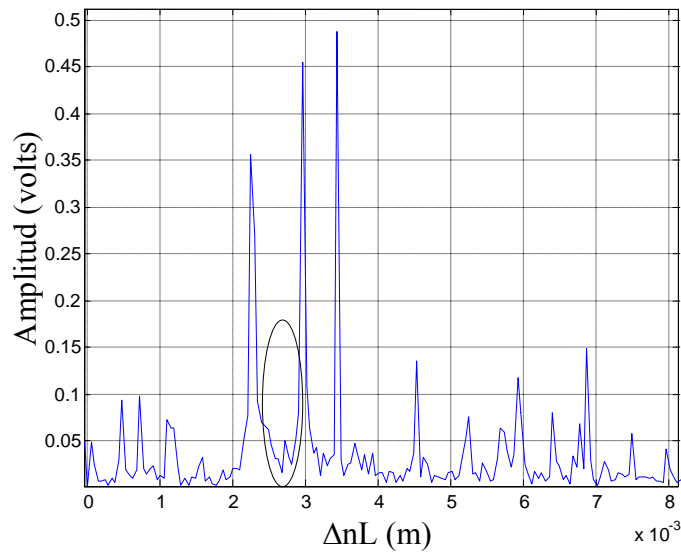


Figura 44. Espectro de Fourier de logaritmo de señal.

Si tenemos una señal de salida del arreglo experimental dada por la multiplicación de transmitancias de cada interferómetro como se expresa en la Ec.51.

$$I_s = I_o T_a T_b T_c . \quad (51)$$

Al aplicar logaritmo a la señal de salida tenemos que:

$$\log(I_s) = \log(I_o T_a T_b T_c) = \log(I_o) + \log(T_a) + \log(T_b) + \log(T_c) . \quad (52)$$

Debido a que las multiplicaciones son convertidas en sumas, las componentes parásitas son suprimidas y prácticamente desaparecen del espectro de Fourier. Una vez resuelto el problema al suprimir las componentes parásitas que interfieren con las componentes fundamentales de cada sensor. El procesado de señales es prácticamente el mismo que se realizó en los experimentos anteriores.

IV.4.2. Resultados experimentales

En este experimento se utilizó el esquema mostrado en la figura 40. En el cual se utilizaron tres interferómetros con lazos de fibra HBF como elemento sensor con longitudes de 6m, 8m y 10m.

Se sometió el interferómetro de lazo de longitud de fibra birrefringente de 8m a cambios de temperatura que se muestran en la figura 45c). En este experimento se utilizó el interferómetro con un lazo de fibra birrefringente de 6m como interferómetro de compensación.

En la figura 45b) se muestra la diferencia de camino óptico (ΔnL) para el interferómetro de 8m en donde podemos observar que responde linealmente a los cambios de temperatura que se muestran en la figura 45c). Por otra parte en la figura 45d) se muestra la razón entre el interferómetro sensor y el interferómetro de compensación. Se observa que se eliminan los brincos ocasionados por la inestabilidad en el barrido del láser.

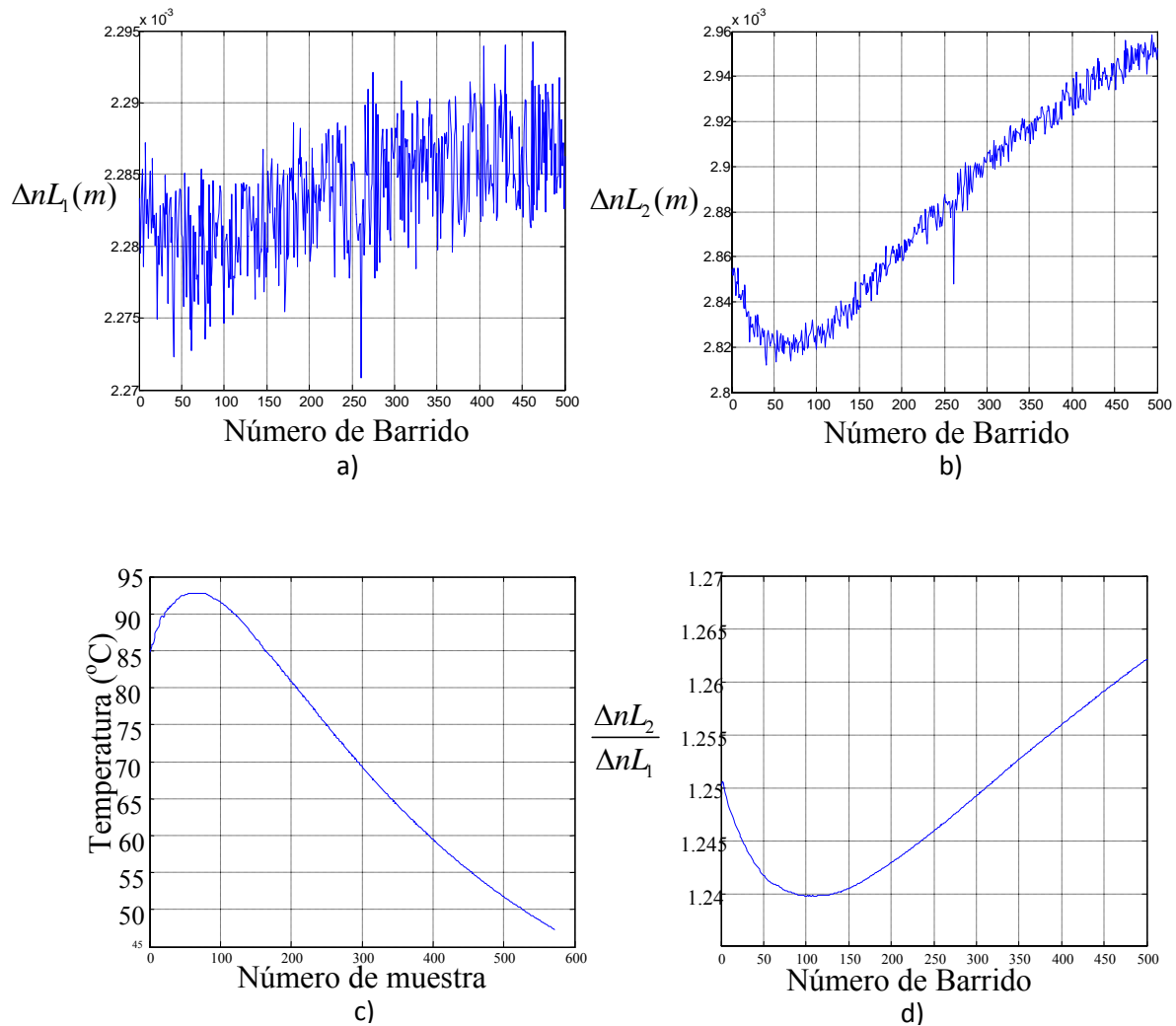


Figura 45. a) Diferencia de camino óptico de sensor de referencia. b) Diferencia de camino óptico de sensor de 8m. c) Temperatura aplicada a sensor de 8m. d) Razón entre interferómetros.

Se realizó un segundo experimento, en donde se sometió el interferómetro de lazo de longitud de fibra HBF de 10m a cambios de temperatura. Al igual que en el experimento anterior se puede apreciar que el interferómetro formado por el lazo de fibra birrefringente de longitud de 10m responde linealmente a los cambios de temperatura como se muestra en la figura 46b); donde se observa que al disminuir la temperatura aumenta la birrefringencia al igual que en los experimentos anteriores. En la figura 46c) podemos observar la temperatura a la cual fue sometido el interferómetro con fibra birrefringente de

10m con el detalle que en las primeras 100 muestras se superó el rango dinámico del sensor electrónico con el cual se monitoreaba la temperatura.

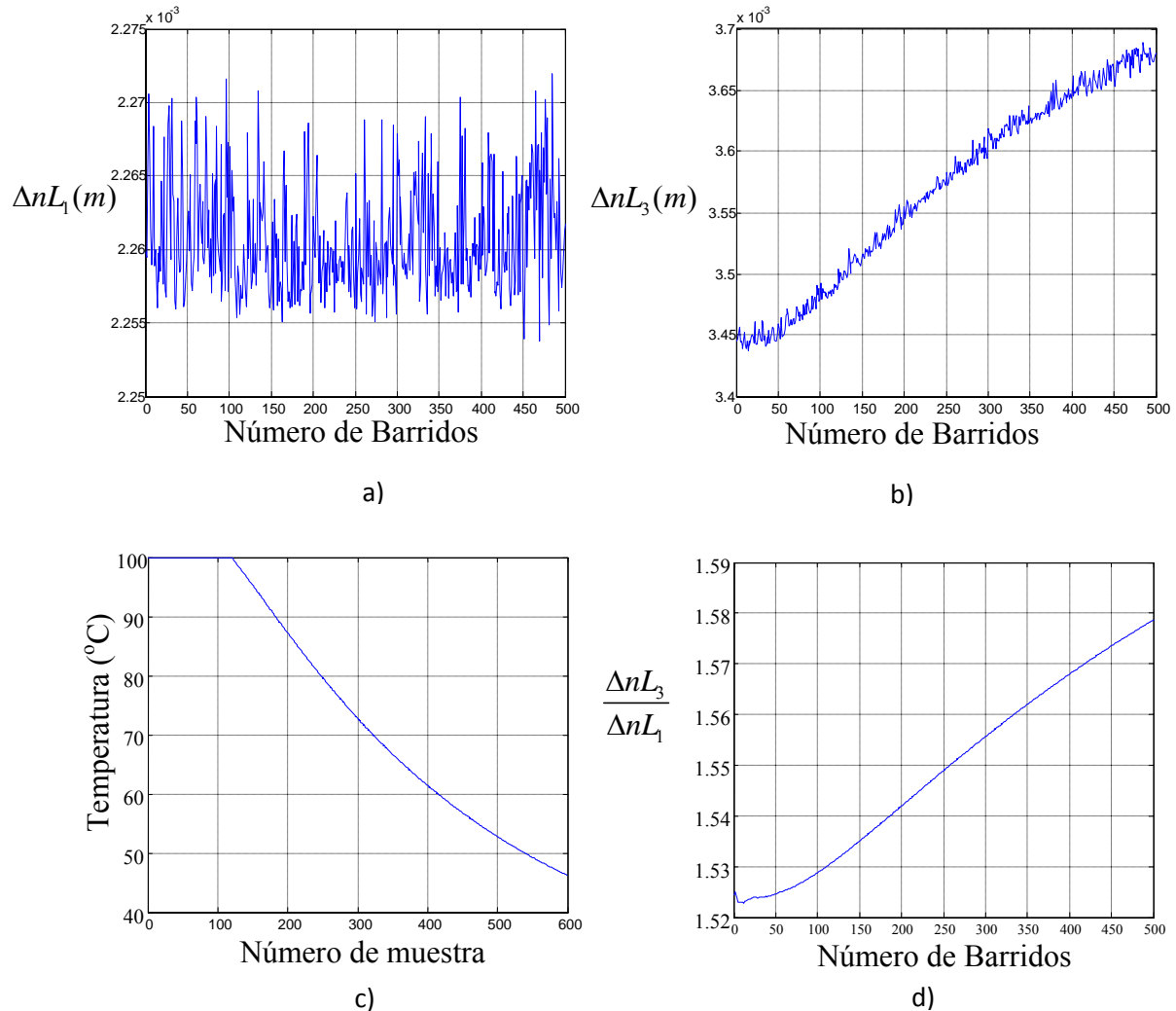


Figura 46. a) Diferencia de camino óptico de sensor de referencia (6m). b) Diferencia de camino óptico de sensor de 10m. c) Temperatura aplicada a sensor de 10m. d) Razón entre interferómetros.

De estos dos experimentos realizados podemos ver que está técnica nos permite tener varios sensores en serie y que además estos puedan usar lazos formados por fibras de una longitud similar. A diferencia del esquema en donde se colocan lazos de fibras de longitudes que son múltiplos de tres, en donde la diferencia en sensibilidad entre el sensor

formado por la fibra más larga y el sensor formado por la fibra mas corta, es enorme en sistemas con más de dos sensores.

IV.5. Experimento con cinco interferómetros de Sagnac

El objetivo principal de este experimento es confirmar si la técnica de multiplexado de sensores desarrollada en el experimento anterior, funciona satisfactoriamente para un número mayor de sensores. Para esto se realizó el diseño de un arreglo experimental que describiremos a continuación.

Para el diseño del experimento se aplicó la metodología desarrollada en el experimento con tres sensores. A continuación mostraremos los cálculos para el diseño del sistema.

Primero se selecciona la longitud de la HBF que formará al sensor de mayor longitud, en nuestro caso se escogió una fibra de 10m, una vez que se conoce la longitud de fibra máxima con la que se trabajará se procede a calcular el número de periodos para este sensor utilizando la Ec 43. En este cálculo se usó $\Delta nL = 3.9e - 3$ a una temperatura de $T_{\min}^{\circ} = 15^{\circ} C$.

$$N_{p_{\max}} = \frac{\Delta nL\Delta\lambda}{(\lambda_{\text{micial}})(\lambda_{\text{final}})} = 81.7 \text{ periodos.}$$

Una vez calculado el número máximo de periodos, se procede a calcular el número de periodos de espaciamiento entre sensores para alcanzar el rango dinámico seleccionado. El rango de temperatura que se desea medir va de $T_{\max}^{\circ} = 110^{\circ} C$ a $T_{\min}^{\circ} = 15^{\circ} C$.

$$P_e = \left(\left(\frac{\beta L (T_{\max}^{\circ} - T_{\min}^{\circ}) \Delta\lambda}{(\lambda_{\text{micial}})(\lambda_{\text{final}})} \right) + 2 \right) = 7.79 \text{ periodos}$$

Se procede a calcular el número de periodos de la señal para el sensor de menor longitud utilizando la Ec.46:

$$N_{p\min} = \frac{N_{p\max}}{2} + P_e = 48.35 \text{ periodos.}$$

Una vez calculado el número de mínimo de periodos que se necesitan para que el sistema funcione correctamente, se continúa con el diseño del sistema de sensores utilizando las Ec. 48, 49 y 50 de la siguiente manera. Primero se calcula el número de periodos para el segundo sensor con base en el número de periodos del primer sensor y los periodos de espaciamiento requeridos para cubrir el rango dinámico.

$$N_{p1} = N_{p\max} = 82.25 \text{ periodos,}$$

$$N_{p2} = N_{p1} - P_{e1} = 74.46 \text{ periodos.}$$

Obtenido el número de periodos para el segundo sensor, se procede a calcular la longitud de este mismo sensor de la siguiente manera:

$$L_2 = \frac{N_{p2}(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})}{\Delta n \Delta \lambda} = 9.056m.$$

Calculada la longitud para el segundo sensor, se procede a calcular el número de periodos de espaciamiento requerido para cubrir el rango de temperatura:

$$P_{e2} = \left(\left(\frac{\beta L_2 (T_{\max}^o - T_{\min}^o) \Delta \lambda}{(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})} \right) + 2 \right) = 7.24 \text{ periodos.}$$

Para encontrar la longitud de los sensores restantes se repite el procedimiento anterior.

Para el sensor número tres:

$$N_{p3} = N_{p2} - P_{e2} = 67.2 \text{ periodos}$$

$$L_3 = \frac{N_{p3}(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})}{\Delta n \Delta \lambda} = 8.17m$$

$$P_{e3} = \left(\left(\frac{\beta L_3 (T_{\max}^o - T_{\min}^o) \Delta \lambda}{(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})} \right) + 2 \right) = 6.73 \text{ periodos}$$

Para el sensor número cuatro:

$$N_{p4} = N_{p3} - P_{e3} = 60.48 \text{ periodos}$$

$$L_4 = \frac{N_{p4}(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})}{\Delta n \Delta \lambda} = 7.35m$$

$$P_{e4} = \left(\left(\frac{\beta L_4 (T_{\max}^o - T_{\min}^o) \Delta \lambda}{(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})} \right) + 2 \right) = 6.25 \text{ periodos}$$

Para el sensor número cinco:

$$N_{p5} = N_{p4} - P_{e4} = 54.2 \text{ periodos}$$

$$L_5 = \frac{N_{p5}(\lambda_{inicial})(\lambda_{final})}{\Delta n \Delta \lambda} = 6.6m$$

Terminado el diseño del sistema, se realizó el arreglo experimental formado por una fuente de luz láser sintonizable, un objetivo de microscopio de 10x utilizado para acoplar la luz a la fibra óptica y cinco interferómetros de Sagnac. Estos interferómetros están formados por acopladores de fibra óptica de 50/50 con lazo de fibra birrefringente (HBF) como elemento sensor de longitudes alrededor de 6,7,8,9 y 10m, uno de los cuales es utilizado como interferómetro de compensación y los cuatro restantes como sensores de temperatura respectivamente. Además se utilizaron circuladores de fibra óptica en medio de

los interferómetros. Se utilizó un fotodetector el cual convierte las variaciones de intensidad a variaciones de voltaje, una tarjeta de adquisición de datos para convertir de una señal analógica a digital y por último una computadora la cual se conecta al láser sintonizable y a la tarjeta de adquisición de datos con el propósito de sincronizar el experimento y realizar el procesado de señales. En la figura 47 se muestra el arreglo experimental.

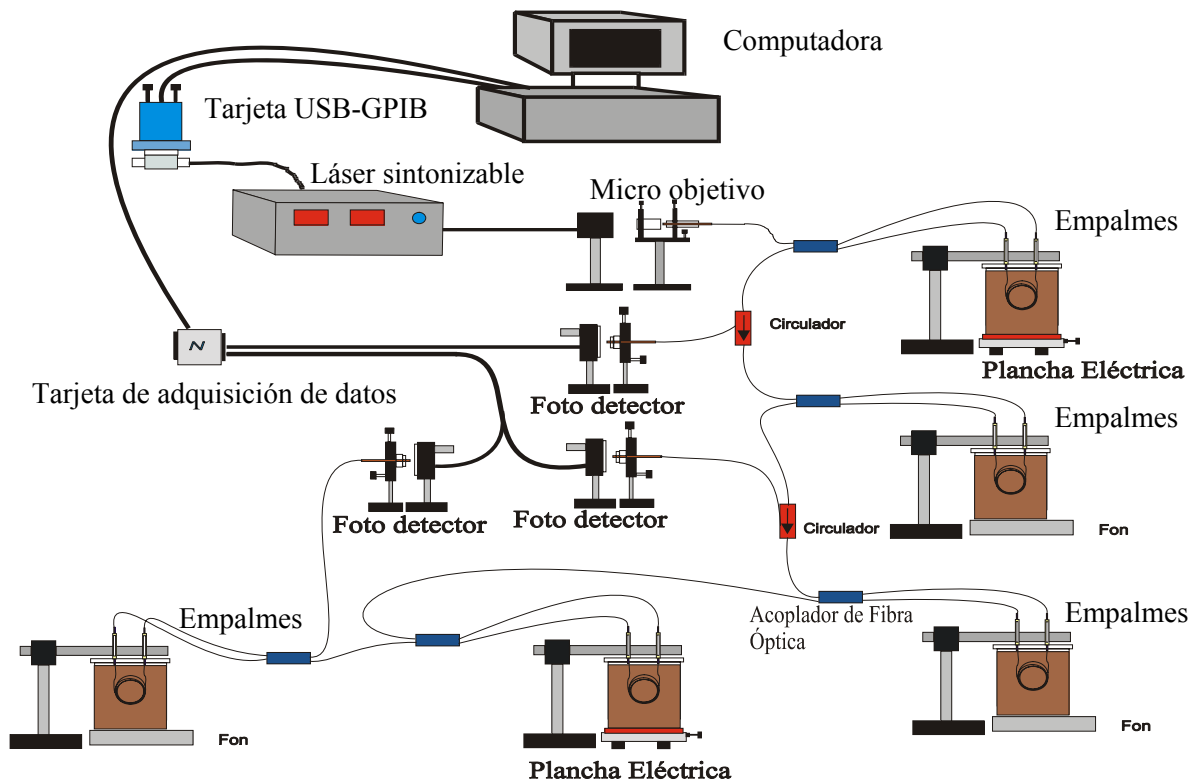


Figura 47. Arreglo experimental con cinco interferómetros.

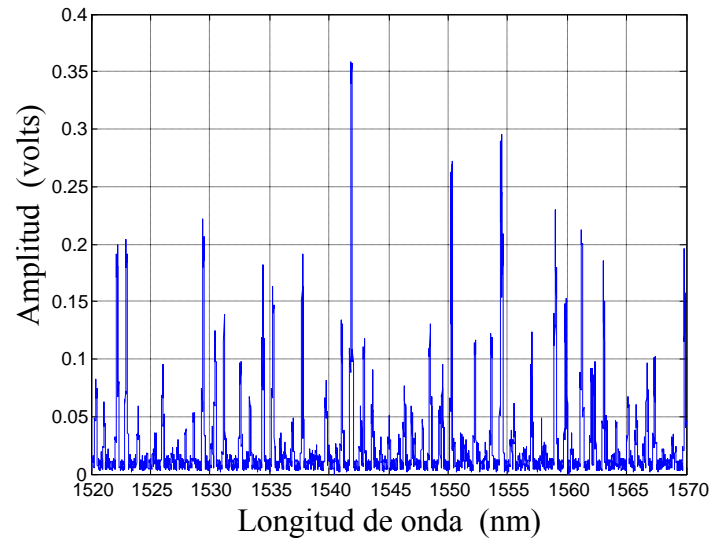


Figura 48. Señal de salida de arreglo experimental.

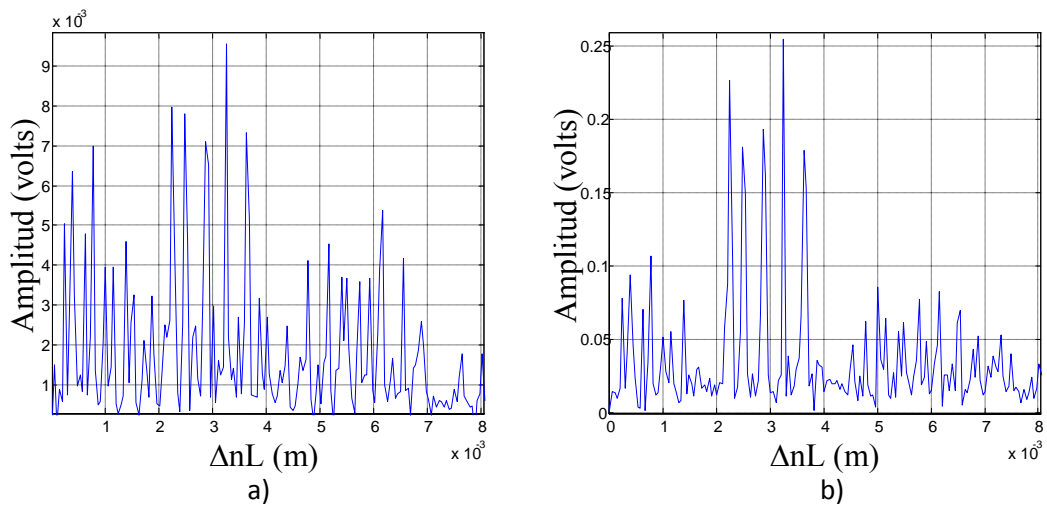


Figura 49. a) Espectro de Fourier de señal. b) Espectro de Fourier de logaritmo de señal.

IV.5.1. Resultados experimentales

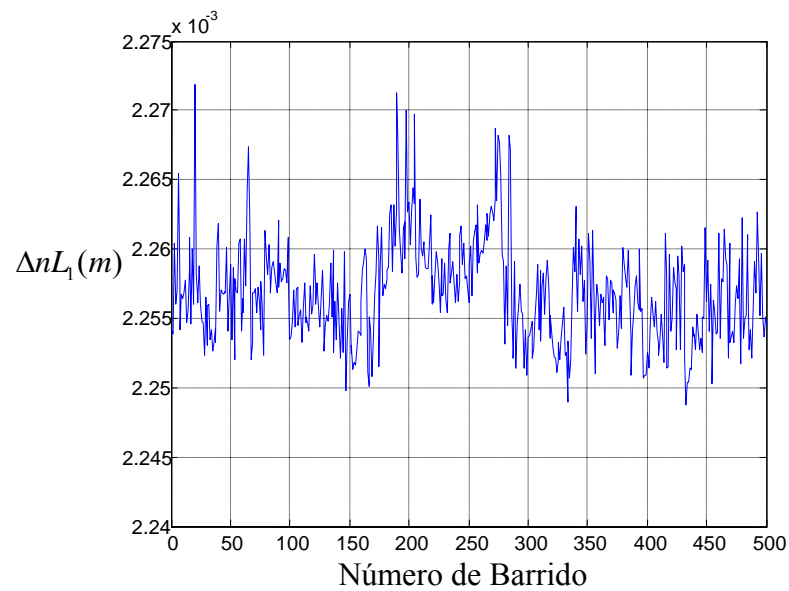


Figura 50. Diferencia de camino óptico del sensor de referencia.

En este experimento se utilizó el arreglo experimental mostrado en la figura 47 el cual hace uso de cinco interferómetros con lazos de HBF como elemento sensor con longitudes de 6m, 7m, 8m, 9m y 10m. Los sensores con longitudes de fibra HBF de 8m y 10m, se calentaron a una temperatura de 65°C, dejándolos enfriar para tomar mediciones conforme la temperatura bajó.

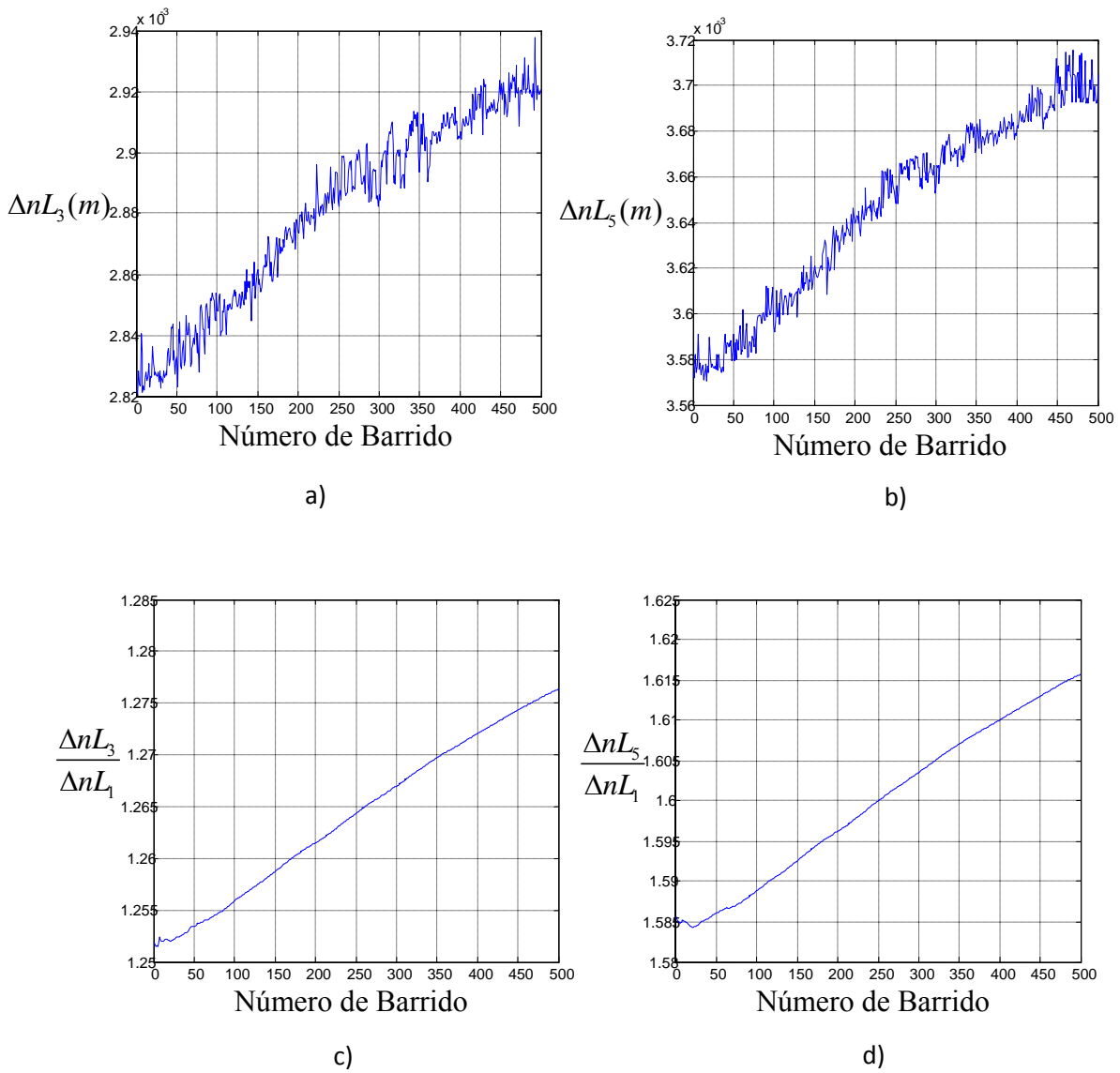


Figura 51. a) Diferencia de camino óptico del sensor de 8m. b) Diferencia de camino óptico del sensor de 10m. c) Razón entre el sensor de 8m y el sensor de referencia (6m). d) Razón entre el sensor de 10m y el sensor de referencia (6m).

Se realizó un segundo experimento donde se utilizó el mismo arreglo experimental mostrado en la figura 47. En el cual se utilizaron cinco interferómetros con lazos de HBF como elemento sensor, con longitudes de 6m, 7m, 8m, 9m y 10m. Esta vez los sensores con longitudes de fibra HBF de 7m y 10m, se calentaron a una temperatura de 65°C, dejándolos enfriar para tomar mediciones conforme la temperatura bajó.

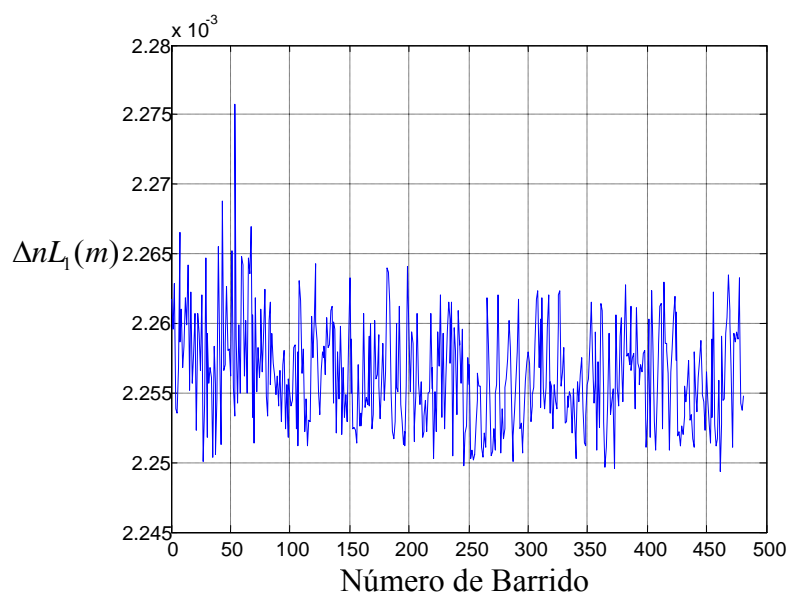


Figura 52. Diferencia de camino óptico del sensor de referencia.

En la figura 52 se muestra la diferencia de camino óptico para el sensor de referencia. En esta gráfica se observa que la diferencia de camino óptico se mantiene relativamente constante debido a que la temperatura a la cual es sometido este sensor de referencia es la temperatura ambiente.

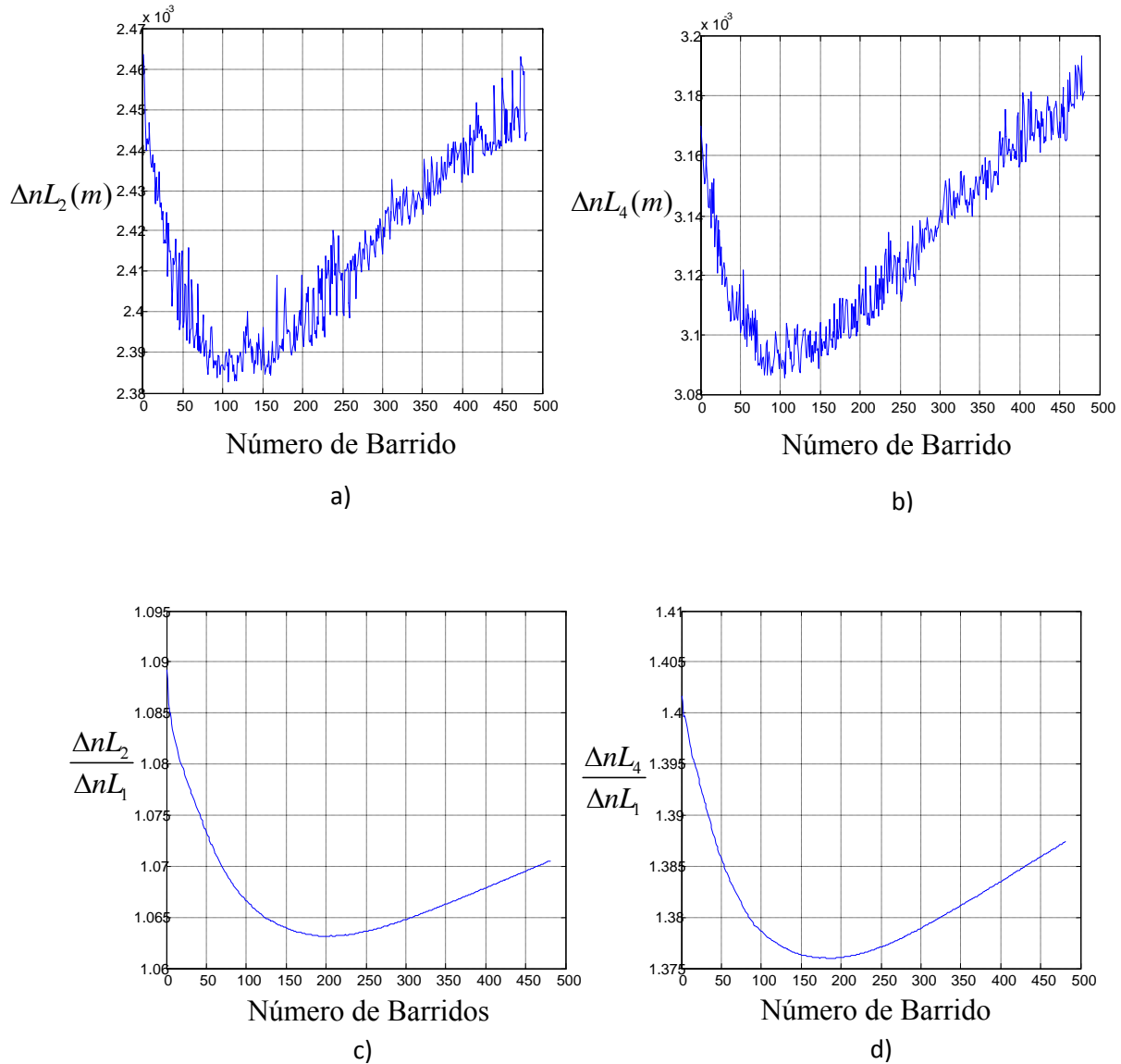


Figura 53 . a) Diferencia de camino óptico del sensor de 7m. b) Diferencia de camino óptico del sensor de 9m. c) Razón entre el sensor de 7m y el sensor de referencia. d) Razón entre el sensor de 9m y el sensor de referencia.

Al observar los resultados de los dos últimos experimentos con cinco interferómetros, es evidente que la técnica para interrogar a los sensores del sistema funciona satisfactoriamente, como en el experimento con tres interferómetros.

Conclusiones.

De los experimentos mostrados en este capítulo podemos concluir que es necesario utilizar un interferómetro de referencia cuando se utiliza un láser sintonizable en sistemas de sensores que utilizan la técnica de baja coherencia. Como mencionamos a lo largo de este capítulo, la función de este interferómetro de referencia es la de compensar las inestabilidades en el sistema.

Además, en este capítulo se mostró la técnica de multiplexado de sensores de fibra óptica basados en la técnica de baja coherencia; en donde se seleccionan HBF' que forman los lazos de Sagnac con longitudes múltiplos de tres. Se observó que esta técnica funcionará para un sistema de dos o más sensores, con la inconveniencia de tener una diferencia de sensibilidad entre el sensor formado por la fibra más corta y el sensor formado por la fibra más larga. Por esta razón esta técnica no es la ideal para realizar un sistema multiplexado de sensores.

Al ver los resultados de los dos experimentos con cinco sensores, podemos concluir que la técnica de multiplexado de sensores desarrollada con base en los experimentos con tres sensores, en donde las longitudes de fibras HBF se seleccionan con base en el número de periodos de espaciado entre componentes fundamentales, en conjunto con la aplicación de la función logaritmo en el procesamiento de señales, funciona satisfactoriamente para un arreglo de cinco sensores en serie.

Capítulo V

Programas de simulación

Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de investigación numérica de la técnica de multiplexado de sensores mostrada en el capítulo anterior. Se explicará el funcionamiento del simulador numérico, y por último se analizan numéricamente las características del sistema de multiplexado de sensores, con el objetivo principal de determinar el número máximo de sensores que pueden ser incluidos en un sistema de multiplexado en serie.

V.1. Límite teórico para el número de sensores.

En sistemas de multiplexado de sensores existen varios parámetros que se deben considerar para el buen funcionamiento del sistema, uno de estos parámetros es la potencia de la señal de salida del sistema de sensores, pues si la señal de salida no es medible no podemos procesar las señales. Este es un parámetro importante que limita el número de sensores. El segundo parámetro importante es el rango dinámico del sistema de sensores, pues entre mayor sea el rango dinámico, se necesitará un número de periodos de espaciamiento (P_e) mayor para evitar traslapes entre señales de sensores en el espectro de Fourier.

Para determinar el número máximo de sensores con base en el parámetro de potencia, se propone que este número de sensores se asocie a una razón señal a ruido (SNR por sus siglas en inglés Signal to noise ratio) igual a 2.

$$SNR = \frac{(RP_s)^2}{2e((RP_m) + I_d)\Delta f + \frac{4K_B T_B^o}{R_L}\Delta f}, \quad (54)$$

donde P_s es la potencia de señal incluida dentro de las bandas laterales de la potencia óptica de salida total P_o del sistema de sensores, P_m es la potencia de salida promedio, R es la responsividad del fotodetector, e es la carga del electrón 1.6021×10^{-19} C, I_d es la corriente de oscuridad del foto detector, Δf es el ancho del pico espectral de la señal de salida del sistema de sensores en el espectro de Fourier $\Delta f = (10F_s/(N-1))$, K_B es la constante de Boltzmann 1.38×10^{-23} J/°K, T_B^o es la temperatura del fotodetector en °K y R_L es la resistencia de carga.

Cuando tenemos un solo sensor en el sistema, la transmitancia está dada por:

$$T = [1 - 2\alpha(1 - \alpha)(1 + \cos \varphi)]. \quad (55)$$

Al desarrollar el producto se obtiene:

$$T = \left[\underbrace{1 - 2\alpha(1 - \alpha)}_{\text{promedio}} - \underbrace{2\alpha(1 - \alpha)}_{\text{amplitud_señal}} \cos \varphi \right]. \quad (56)$$

Por lo tanto tenemos que para un sensor, la potencia óptica de señal está dada por:

$$P_s = P_i [2\alpha(1-\alpha)]. \quad (57)$$

Sin embargo estas expresiones cambian en medida que se agregan sensores al sistema, por esta razón se analizará como obtener una expresión general donde se incluya el número de sensores que forman el sistema. Cuando se tienen dos sensores en serie, la transmitancia está dada por la siguiente ecuación:

$$T = [1 - 2\alpha(1-\alpha)(1 + \cos \varphi_1)][1 - 2\alpha(1-\alpha)(1 + \cos \varphi_2)]. \quad (58)$$

Si desarrollamos este producto, la Ec 58. queda expresada de la siguiente manera:

$$T = \left[\underbrace{1 - 2(2\alpha(1-\alpha)) + (2\alpha(1-\alpha))^2}_{\text{promedio}} + \left(\underbrace{(-2\alpha(1-\alpha) + (2\alpha(1-\alpha))^2)}_{\text{amplitud_señal}} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \right) + \left(\underbrace{(2\alpha(1-\alpha))^2}_{\text{amplitud_parasitas}} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \right) \right] \quad (59)$$

De la Ec.59, podemos observar que la potencia de la señal queda expresada de la siguiente manera:

$$P_s = P_i [2\alpha(1-\alpha) - (2\alpha(1-\alpha))^2]. \quad (60)$$

Al realizar el mismo procedimiento para un sistema con tres sensores tenemos que la potencia de señal P_s se expresa:

$$P_s = P_i [2\alpha(1-\alpha) - 2(2\alpha(1-\alpha))^2 + (2\alpha(1-\alpha))^3]. \quad (61)$$

Y por último para un sistema de cuatro sensores tenemos que la potencia de salida estará dada por la siguiente ecuación.

$$P_s = P_i \left[2\alpha(1-\alpha) - 3(2\alpha(1-\alpha))^2 + 3(2\alpha(1-\alpha))^3 - (2\alpha(1-\alpha))^4 \right]. \quad (62)$$

Al observar como cambia la expresión para P_s , dependiendo del número de sensores, podemos simplificar como se muestra en la siguiente ecuación.

$$P_s = P_i \left[(2\alpha(1-\alpha))(1-2\alpha(1-\alpha))^{(M-1)} \right]; \quad (63)$$

donde M es el número de sensores colocados en el sistema.

Sin embargo, en un sistema real se tienen pérdidas por empalmes, atenuación de la fibra, etc. Por esta razón es necesario introducir un coeficiente a las expresiones de P_s y P_m . Este coeficiente se encontró experimentalmente en donde se midió la potencia óptica que entra (P_i) a un sensor de fibra óptica y la potencia óptica máxima (P_o) de salida del sensor de fibra óptica. Al calcular P_o/P_i encontramos que $\alpha_p = 0.85$. Es necesario agregar este coeficiente a la expresión para la potencia óptica de señal P_s y para la potencia promedio P_m (Ec.63):

$$P_s = P_i \left[(2\alpha(1-\alpha))(1-2\alpha(1-\alpha))^{(M-1)} \right] \alpha_p^M, \quad (64)$$

$$P_m = P_i \alpha_p^M (1-2\alpha(1-\alpha))^{(M)}. \quad (65)$$

Conociendo la expresión para P_s y P_m podemos continuar rescribiendo la Ec. 54. de la siguiente manera.

$$SNR = \frac{\frac{1}{2} \left(R P_i \left[(2\alpha(1-\alpha))(1-2\alpha(1-\alpha))^{(M-1)} \right] \alpha_p^M \right)^2}{2e \left(\left(R P_i \alpha_p^M (1-2\alpha(1-\alpha))^{(M)} \right) + I_d \right) \Delta f + \frac{4K_B T_B^o}{R_L} \Delta f}; \quad (66)$$

donde P_i es la potencia óptica de entrada.

Para calcular el límite teórico del número máximo de sensores que es posible colocar en serie, tomando en cuenta la SNR, suponemos que tenemos un sistema ideal sin pérdidas en donde $\alpha_p = 1$. Además suponemos una corriente de oscuridad nula del fotodetector ($I_d = 0$), que no existe ruido térmico en el fotodetector ($T_B^o = 0^o K$), y una potencia de entrada $P_i = 1mW$, con $\Delta f = (F_s)/(N-1) = 4Hz$. En pocas palabras el único ruido presente en el sistema es el ruido cuántico.

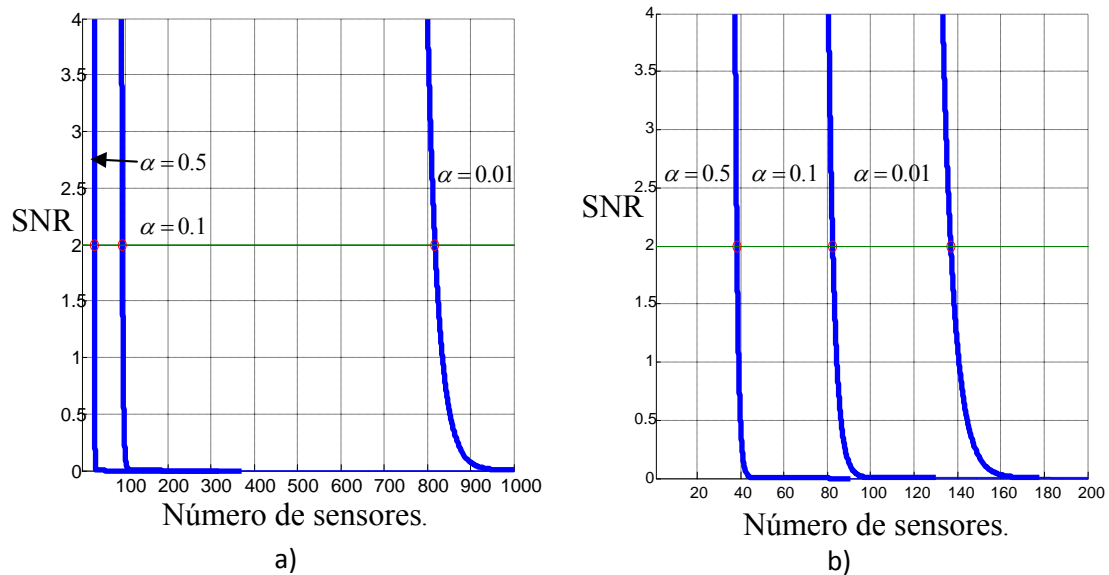


Figura 54. SNR para diferente número de sensores. a) Para un sistema sin pérdidas $\alpha_p = (1)$.
b) Para un sistema real con pérdidas $\alpha_p = (0.85)$.

De la figura 54 se aprecia que el número de sensores aumenta conforme se decremento el coeficiente de acoplamiento α de los acopladores de fibra óptica con los cuales se forman los sensores.

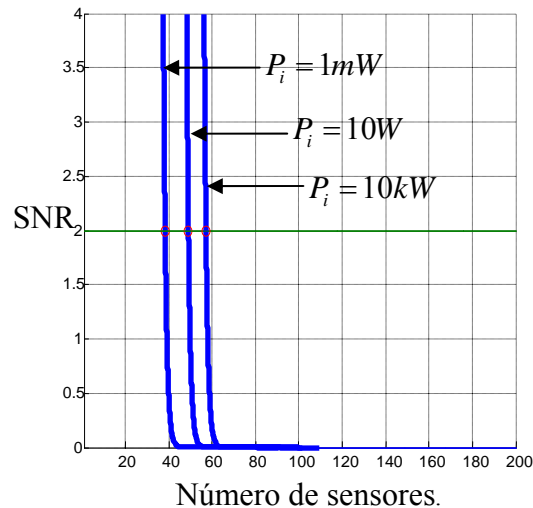


Figura 55. Número de sensores para diferentes potencias, con $\alpha = 0.5$ y $\Delta f = 4Hz$

En la figura 55 se observa que teóricamente al aumentar en la potencia de entrada más de 100 veces P_i , al sistema de sensores, el número de sensores no crece en proporción. Sin embargo si observamos la figura 53, podemos ver un mayor aumento en el número de sensores cuando utilizamos acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha < 0.5$. Si utilizamos los parámetros de los dispositivos de laboratorio y suponemos que nuestro sistema es ideal, en el sentido que no presenta pérdidas ni ruido, resulta que el parámetro que limita el número de sensores en el sistema, es la potencia de señal de salida del sistema de sensores P_s . Esto ocurre al construir los sensores de fibra óptica con acopladores con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.5$; provocando que en este caso en particular el sistema esté limitado por potencia de salida, en alrededor de $M = 23$ sensores.

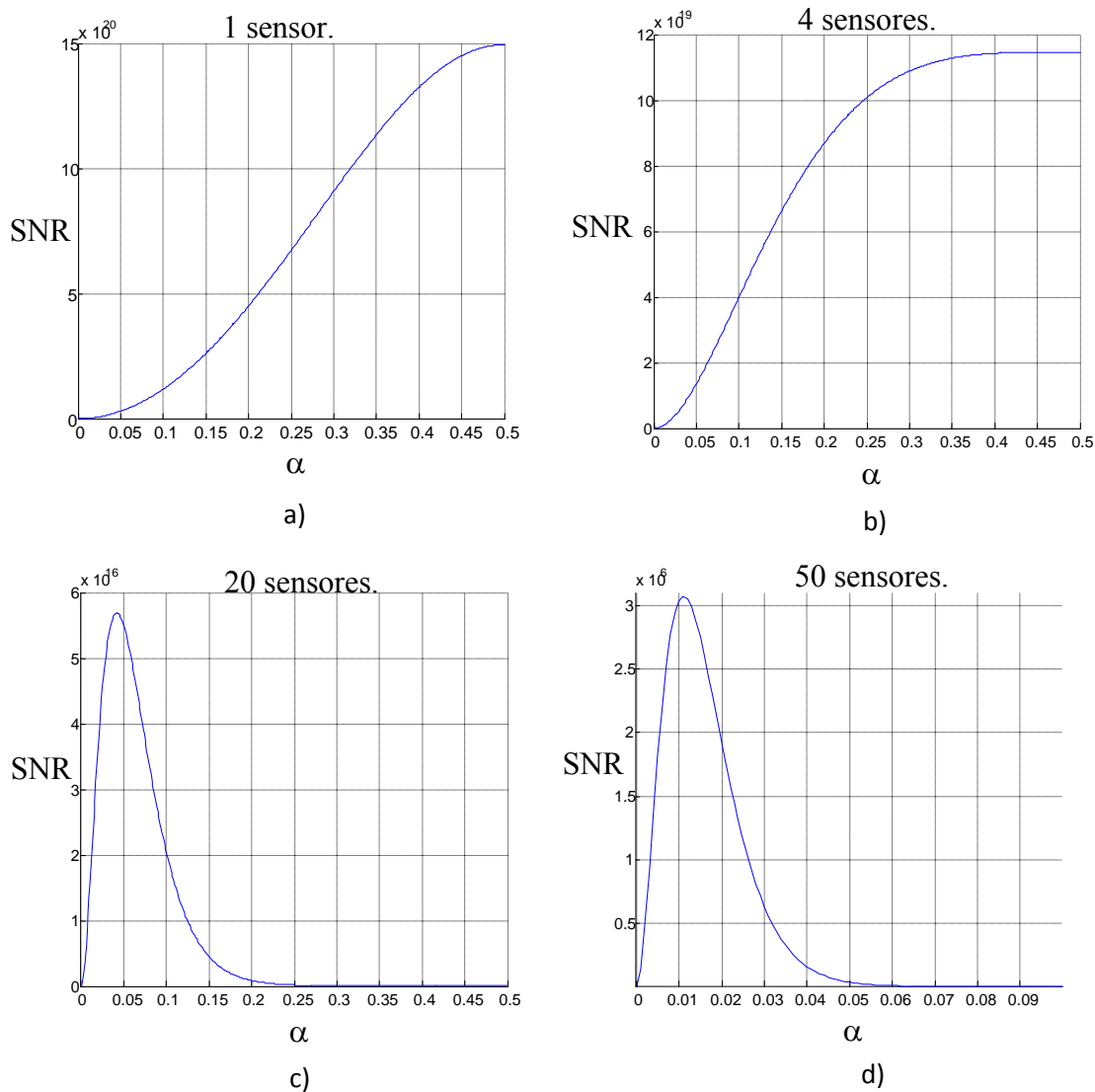


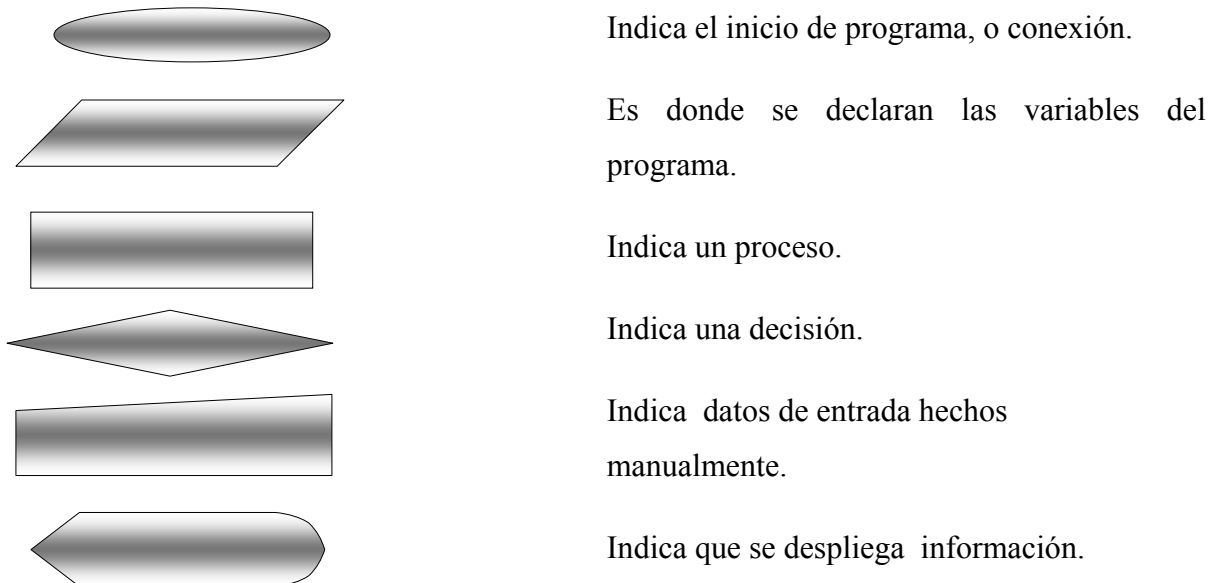
Figura 56. a) SNR para 1 sensor, b) SNR para 4 sensores, c) SNR para 20 sensores, d) SNR para 50 sensores.

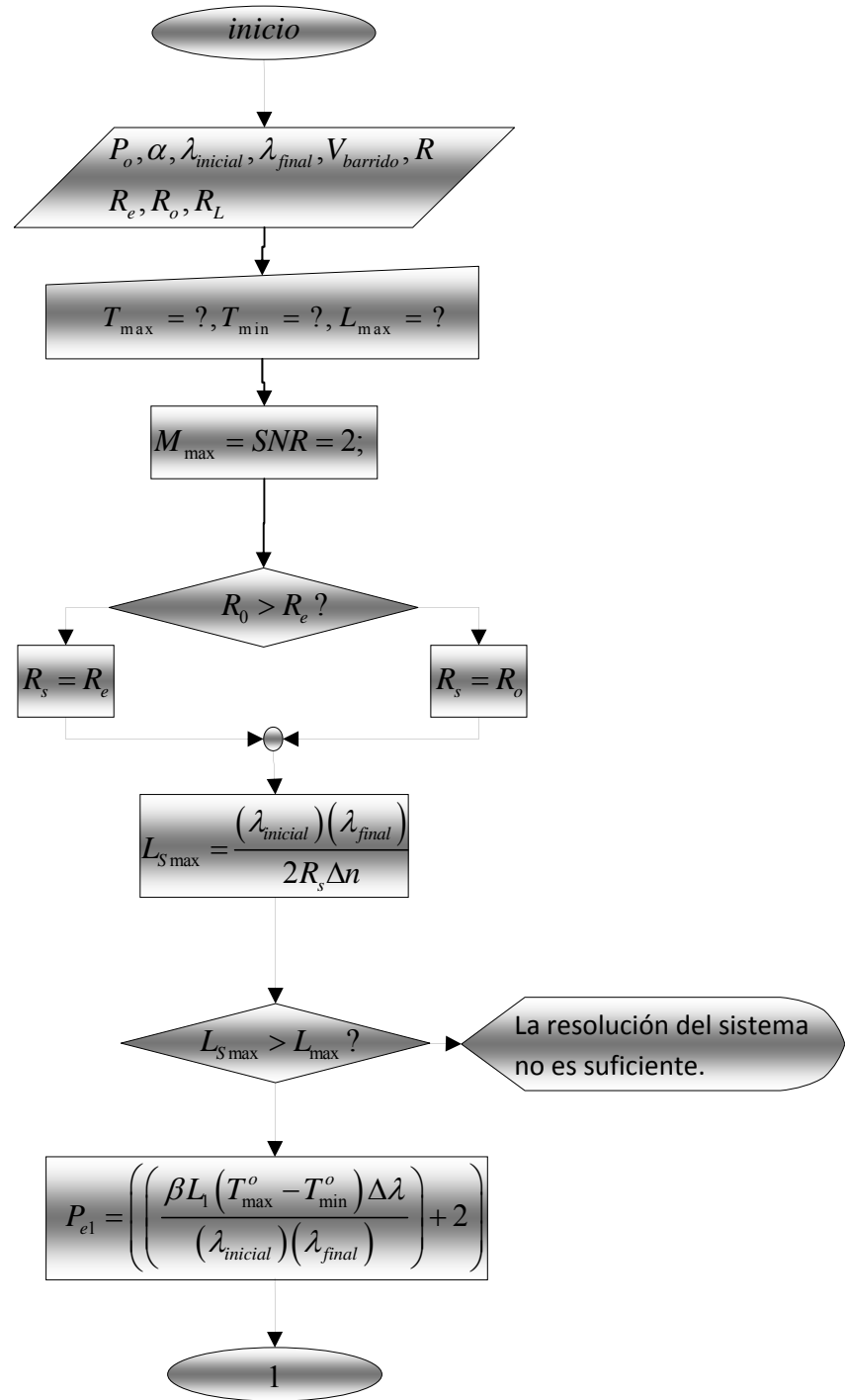
Al evaluar la Ec.54 para diferente número de sensores, podemos observar que existe un α óptimo igual a 0.5 de 1 a 4 sensores, para un número mayor de 4 sensores existe un α óptimo para cada número de sensores. Esto se aprecia en la figura 56, existe una SNR óptima para cada número de sensores. Por tanto, podemos concluir que nuestro arreglo experimental con cinco sensores no es óptimo debido, a que los acopladores de fibra óptica

con los cuales se construyeron los sensores tienen un coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.5$. En esta misma figura 56c,d) podemos observar que para un número de 20 y de 50 sensores, el coeficiente de acoplamiento óptimo está alrededor de $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.01$, respectivamente.

V.2. Programa de diseño de sistema de sensores

El programa de diseño básicamente realiza los pasos mostrados en el capítulo IV.5., en donde se muestran las ecuaciones para diseñar un sistema de sensores en serie. La simbología utilizada para el diseño de algoritmos se muestra a continuación.





Continúa en siguiente página.

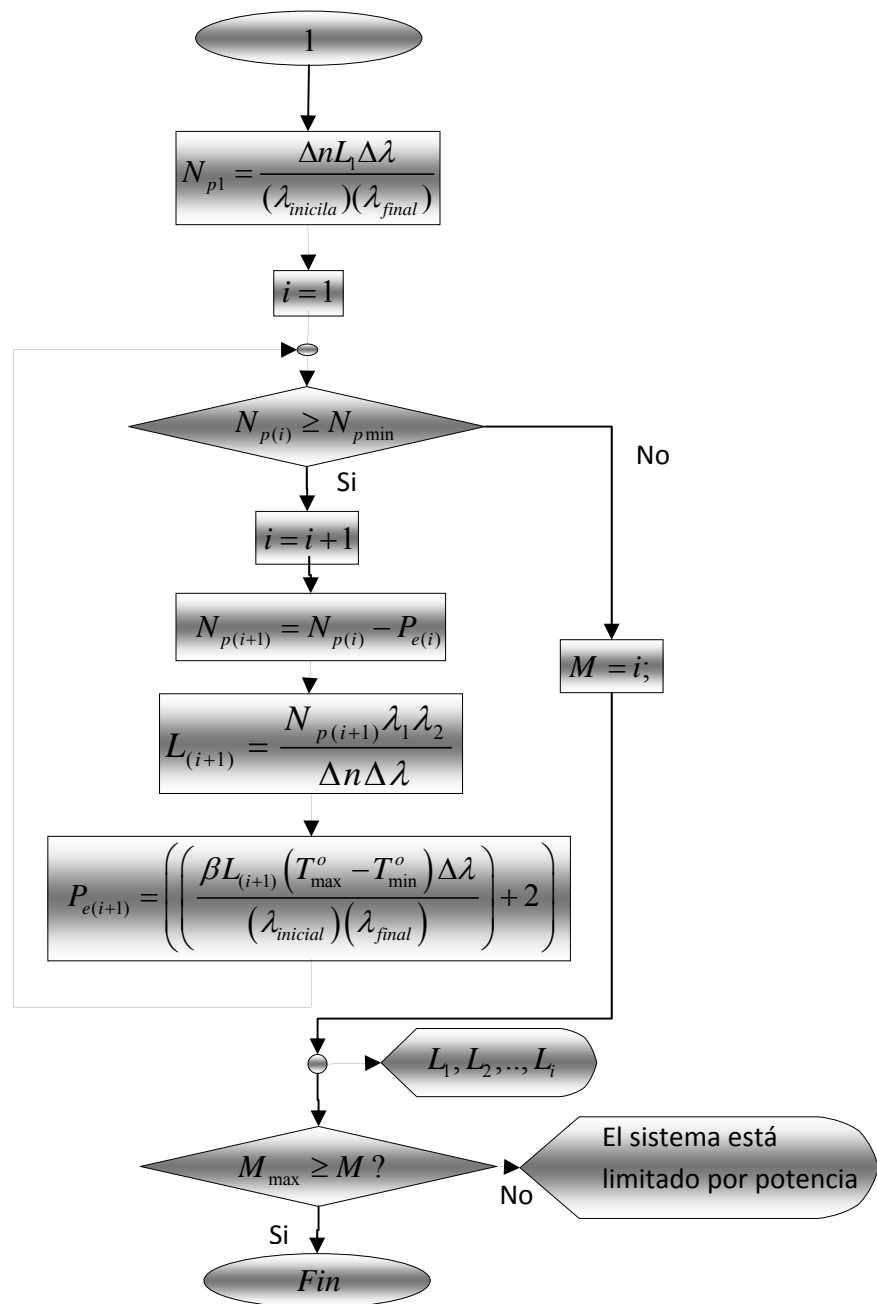


Figura 57. Algoritmo de programa de diseño.

Para determinar el número máximo de sensores con base en el rango dinámico, haremos la suposición que todos los sensores del sistema trabajarán con este mismo rango dinámico. Para esto haremos uso de la metodología de diseño mostrada en el algoritmo de

la figura 57, en donde el número de sensores que es posible colocar en un sistema en serie, tomando en cuenta el rango dinámico, es M .

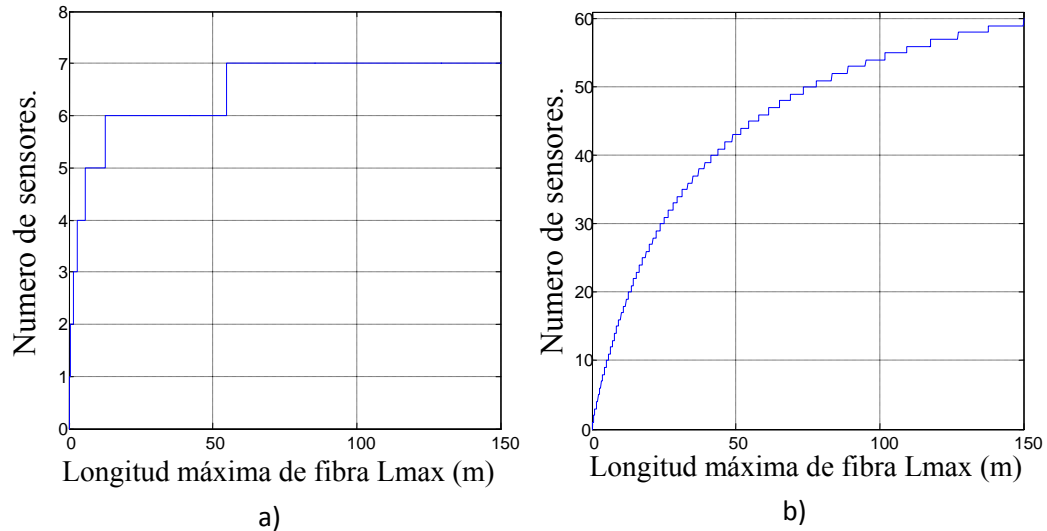


Figure 58. a) Número de sensores con rango dinámico de $100^{\circ}C$.
b) Número de sensores con rango dinámico de $10^{\circ}C$.

Al ver estos resultados es fácil observar que el número de sensores que es posible colocar en un sistema debe satisfacer tanto el criterio del número de sensores que dependen de la SNR, como del número de sensores que dependen del rango dinámico ΔT° . El criterio que dé como resultado menor el número de sensores para un sistema en específico, determinará el número de sensores con el cual se realizará el sistema. Por ejemplo, si construimos los sensores con acopladores de fibra óptica con un coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.1$, a una potencia de entrada $P_i = 1mW$, el número de sensores posible de acuerdo al criterio SNR, suponiendo que el sistema es real en el sentido que tiene pérdidas, es $M_{\max} = 80$ sensores, como se observa en la figura 54b). Por otra parte, el número de sensores que es posible colocar en un sistema cuando se utiliza un rango dinámico $\Delta T^{\circ} = 10^{\circ}C$, usando como longitud máxima de fibra y una resolución del sistema $L_{S_{\max}} = 150m$, es de $M = 58$ sensores, como se observa en la figura 58b). Por lo tanto decimos que el sistema está limitado en número de sensores por rango dinámico.

V.3. Simulador numérico

A continuación se describirá el funcionamiento del simulador numérico; además se hará una comparación entre datos experimentales y datos de simulador.

El programa del simulador básicamente lo que hace es: pide al usuario el número de sensores del sistema y sus longitudes. Calcula el número de muestras que se obtendrán tomando en cuenta el ancho de barrido espectral del láser ($\lambda_{final} - \lambda_{inicial}$), la velocidad de barrido del láser ($V_{barrido}$) y la frecuencia de muestro de la tarjeta de adquisición de datos (F_s). Calcula la transmitancia total del arreglo de sensores. Obtenida la transmitancia total del sistema se realiza la convolución entre el espectro del láser y la transmitancia del sistema de sensores. Una vez completados estos pasos se agrega el ruido del sistema a la señal convertida a voltaje, se calcula su transformada de Fourier y por último el espectro de la señal se despliega en una gráfica. Todo esto se muestra en el algoritmo del programa mostrado en la figura 59.

En la figura 60a,b) se muestran la señal del simulador numérico y la señal de salida del arreglo experimental, respectivamente. De esta figura podemos observar que la amplitud de las señales es similar por lo que podemos decir que el simulador numérico calcula de una manera correcta las pérdidas del sistema. Por otra parte, en la figura 61 se observa en una misma gráfica el espectro de Fourier de la señal experimental y el espectro de Fourier de la señal del simulador numérico. En este espectro el sensor de 6 m fue calentado a una temperatura de $55^{\circ}C$; al igual que en el simulador numérico, el sensor de 6 m fue sometido a la misma temperatura. Debido a esto podemos observar que en la figura 61 difícilmente se puede apreciar una diferencia en la posición de los picos fundamentales de estos dos espectros.

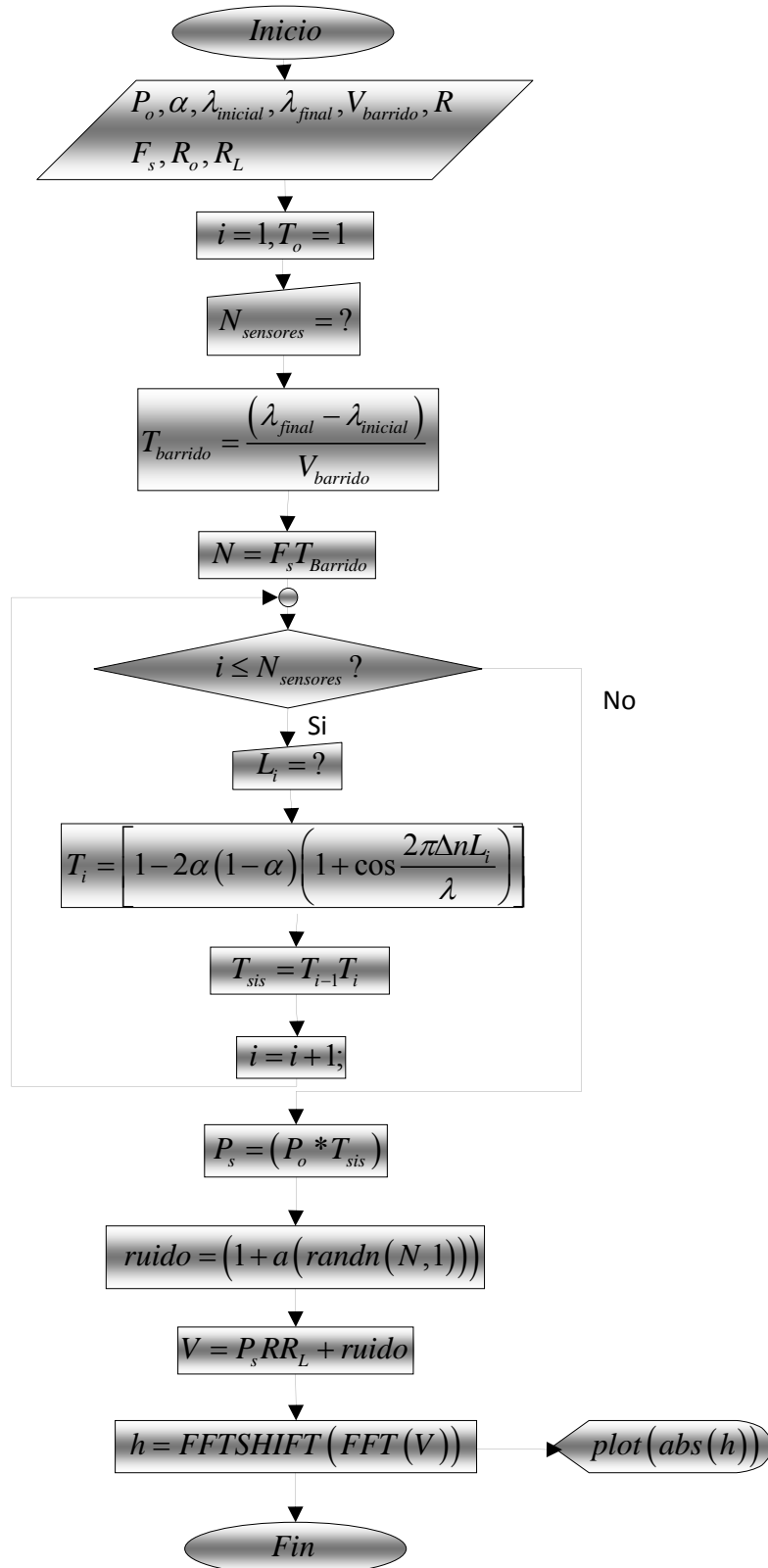


Figura 59. Algoritmo del simulador.

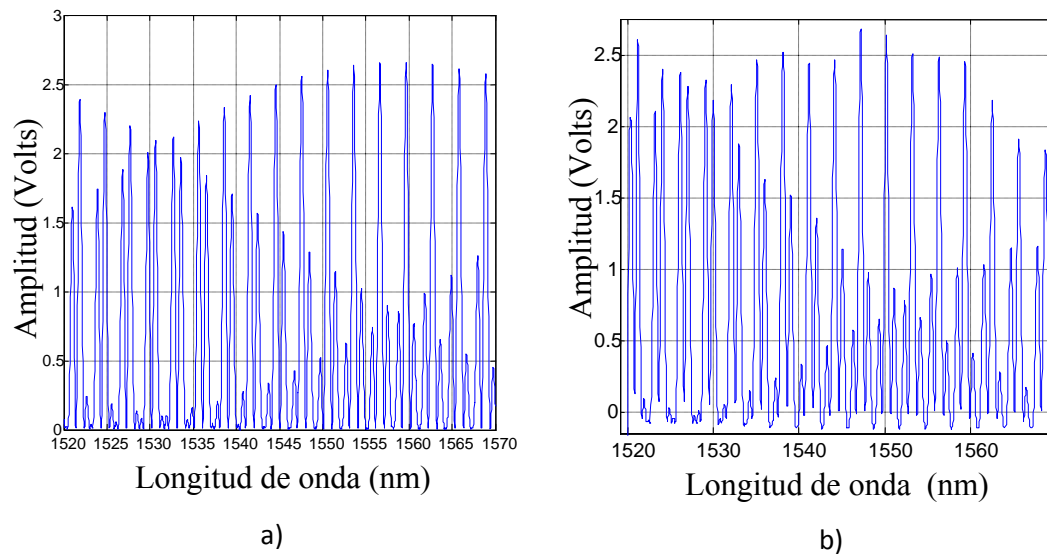


Figura 60. a) Señal del simulador numérico. b) Señal del arreglo experimental.

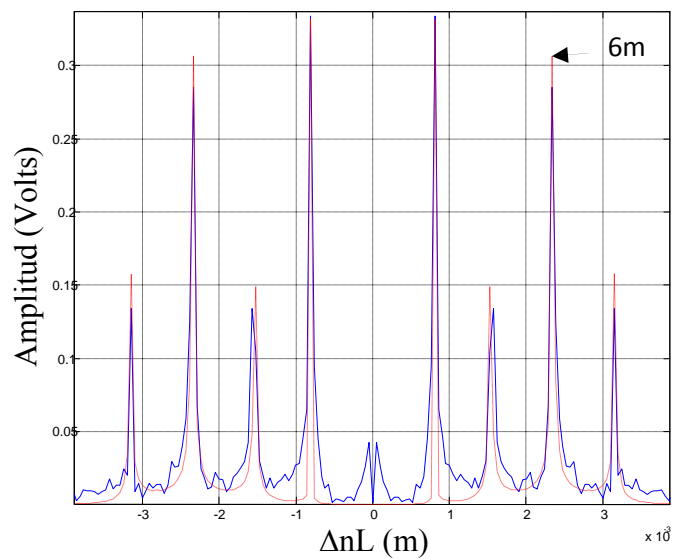


Figura 61. Espectro de la señal experimental (línea continua) y espectro de señal del simulador numérico (línea punteada).

A continuación se compararan los datos experimentales con datos simulados numéricamente. En la figura 62, se observan los cambios de temperatura a los cuales fue sometido un sensor de longitud de 6m; estos mismos cambios de temperatura fueron utilizados para generar las señales del simulador numérico.

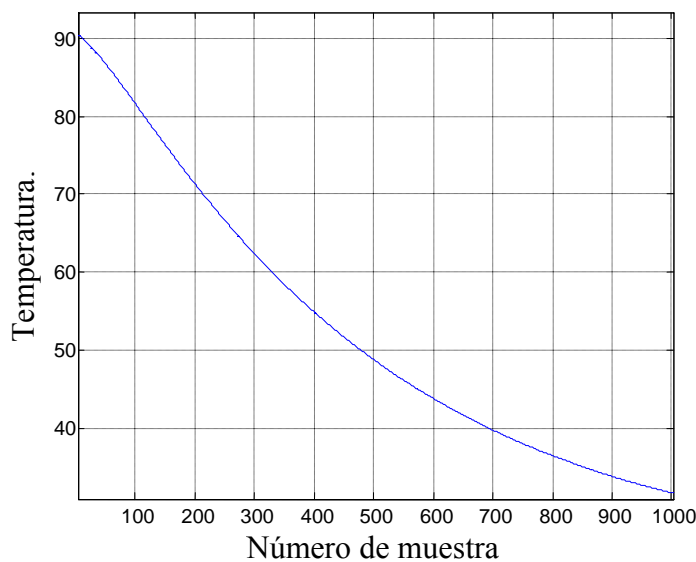


Figura 62. Temperatura aplicada al sensor de 6m.

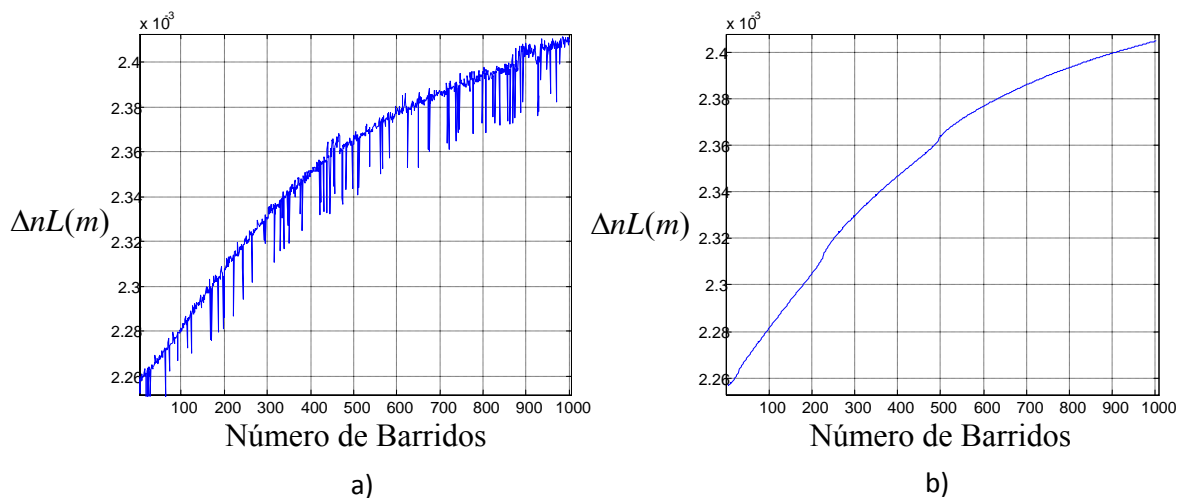


Figura 63. a) Diferencia de camino óptico ΔnL del sensor de 6m. b) Diferencia de camino óptico ΔnL del sensor simulado numéricamente.

En la figura 63a,b) podemos observar la diferencia de camino óptico para el sensor del arreglo experimental y para el sensor simulado numéricamente. De éstas dos gráficas podemos ver que, si ignoramos los brincos ocasionados por la inestabilidad de láser en el sensor del experimento, las dos gráficas concuerdan con los mismos valores.

Una vez que nuestro simulador numérico funciona correctamente, se continuó con la investigación analizando como es afectada la señal de salida, si se utilizan acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento α diferente de 0.5. A continuación se muestran los resultados.

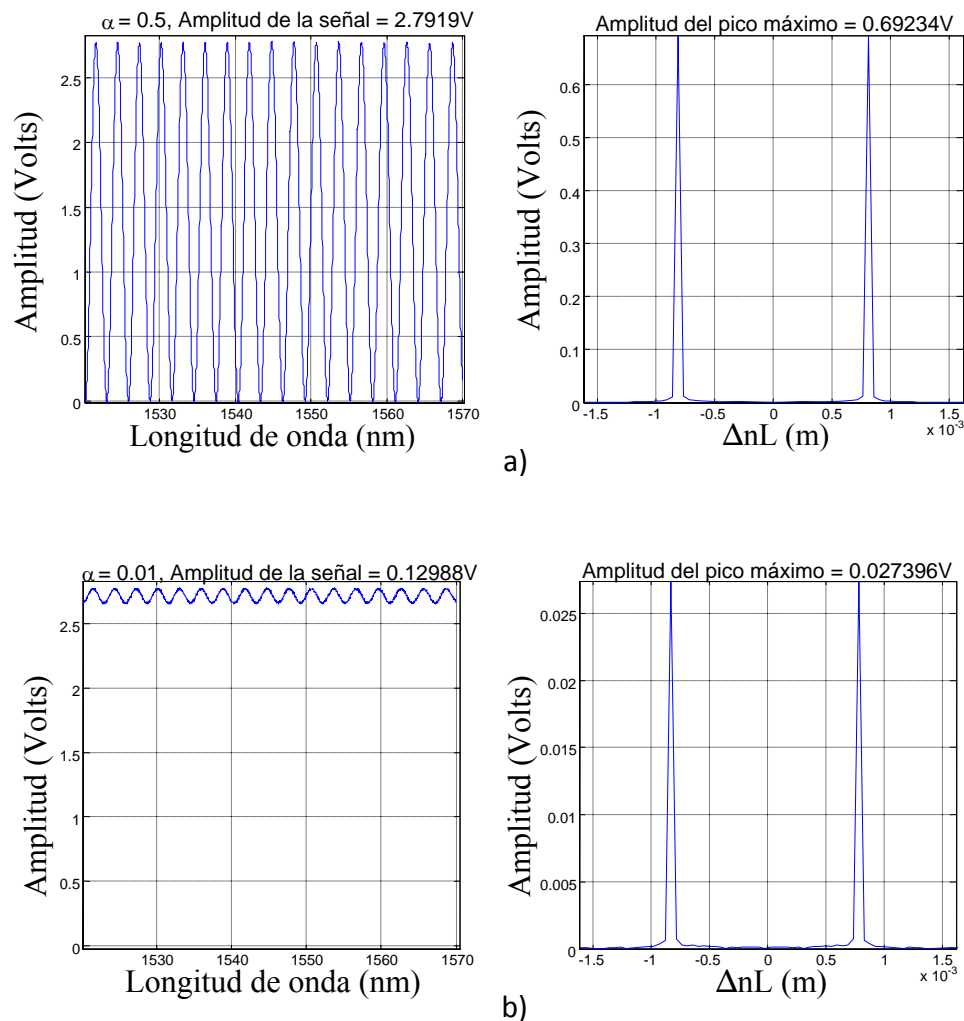


Figura 64. Simulación numérica de señal y espectro de Fourier, para sensores con acopladores de fibra óptica con. a) $\alpha = 0.5$ b) $\alpha = 0.01$.

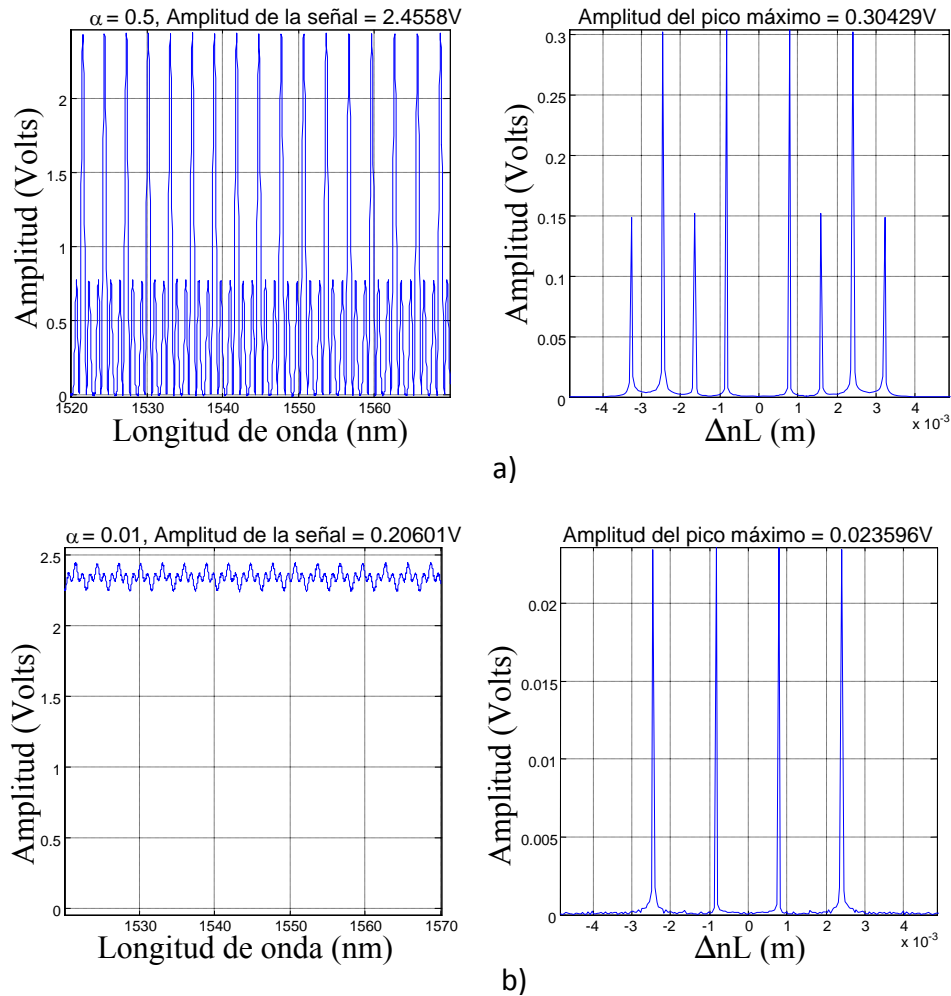


Figura 65. Simulación numérica de señal y espectro de Fourier, para dos sensores con acopladores de fibra óptica con. a) $\alpha = 0.5$ b) $\alpha = 0.01$.

Al observar la figura 64a,b) se aprecia una diferencia fundamental en estas dos señales. Esta diferencia, es la amplitud de modulación de estas dos señales. En la señal de la figura 64a) se observa una modulación del 100%; mientras que en la señal de la figura 64b) tenemos una modulación del 1%, con lo que tenemos dos señales de amplitud muy diferente a causa de utilizar acopladores de fibra óptica con coeficientes de acoplamiento α distintos.

Si continuamos analizando estas señales simuladas observamos la figura 65a,b), donde se simulan dos sensores en serie. Se observa que en el espectro de la señal de la figura 65b) desaparecen las componentes parásitas, lo cual es una ventaja que puede ser utilizada para remplazar el procesado de señales mostrado en el capítulo IV.4.1.

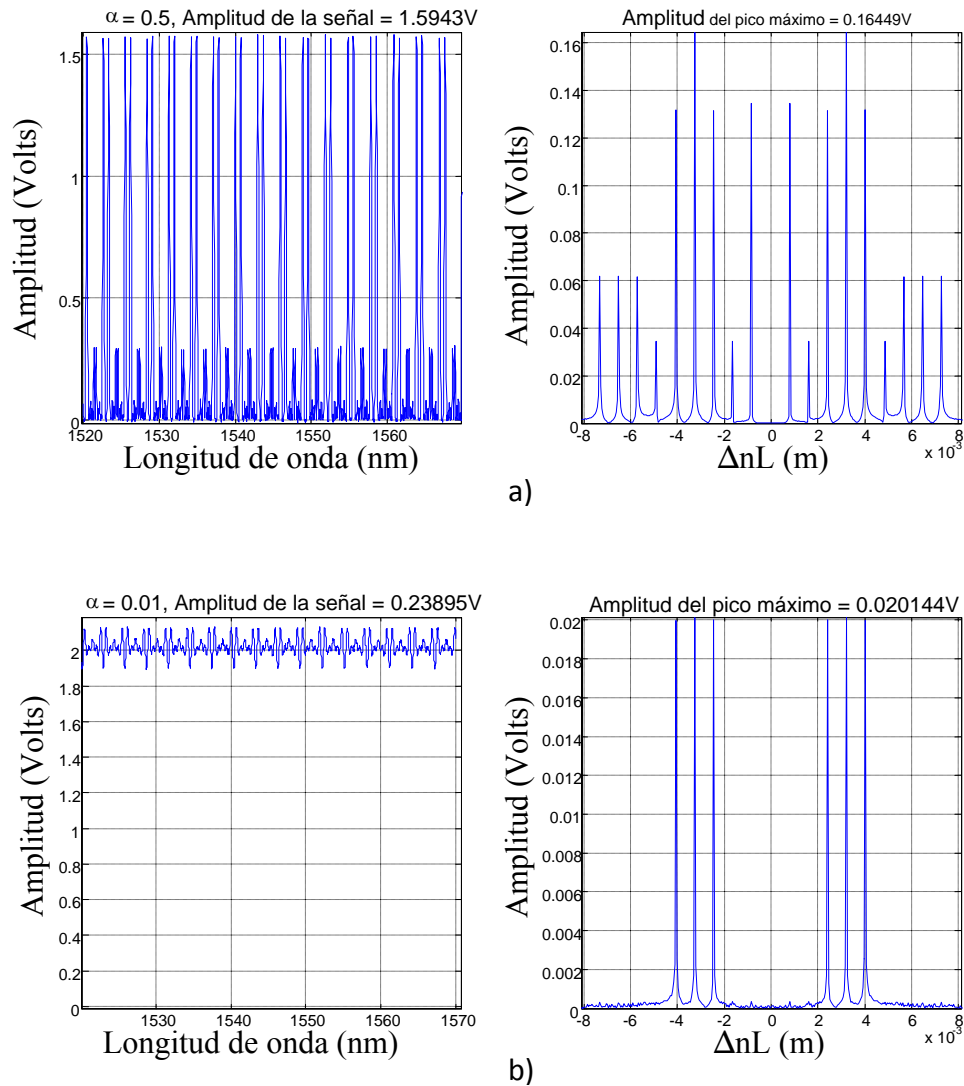


Figura 66. Simulación numérica de señal y espectro de Fourier, para tres sensores con acopladores de fibra óptica con. a) $\alpha = 0.5$ b) $\alpha = 0.01$.

Estas componentes parásitas desaparecen debido a lo siguiente. Si analizamos el caso más sencillo donde tenemos dos sensores en el sistema. Se tendrá una función de transmitancia del siguiente tipo:

$$T = [1 - 2\alpha(1 - \alpha)(1 + \cos \varphi_1)][1 - 2\alpha(1 - \alpha)(1 + \cos \varphi_2)]. \quad (67)$$

Si desarrollamos este producto tendremos expresada esta función como:

$$T = 1 - 2\alpha(1 - \alpha)(1 + \cos \varphi_2) - 2\alpha(1 - \alpha)(1 + \cos \varphi_1) + (2\alpha(1 - \alpha))^2(1 + \cos \varphi_1)(1 + \cos \varphi_2). \quad (68)$$

Observamos que las componentes generadas por la multiplicación de las componentes fundamentales tienen amplitud de $(2\alpha(1 - \alpha))^2$. En el caso de tener un $\alpha = 0.5$, la amplitud de estas componentes parásitas será de $(2\alpha(1 - \alpha))^2 = 0.25$; en otras palabras la mitad de la amplitud de las componentes fundamentales. Si utilizamos acopladores de fibra óptica con $\alpha = 0.01$, tendremos que la amplitud de las componentes parásitas será de $(2\alpha(1 - \alpha))^2 = 3.9 \times 10^{-4}$, en otras palabras mucho menor que las componentes fundamentales.

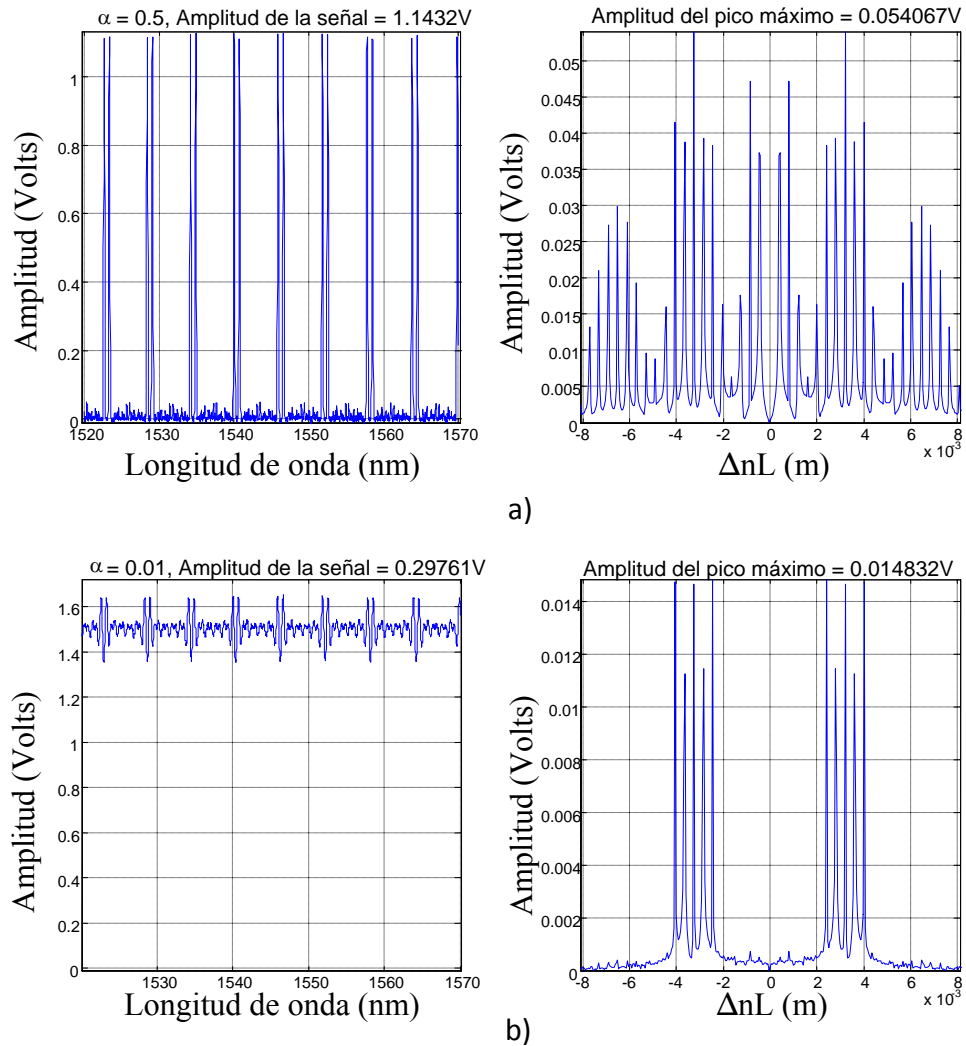


Figura 67. Simulación numérica de la señal y el espectro de Fourier, para cinco sensores con acopladores de fibra óptica con. a) $\alpha = 0.5$ b) $\alpha = 0.01$.

Al observar las figuras 66 y 67, donde se tiene un número de 3 y 5 sensores respectivamente, observamos que al igual que en la figura 64 las componentes parásitas desaparecen del espectro de Fourier de estas dos señales, cuando se utilizan acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.01$. Con lo que reafirmamos que es posible utilizar acopladores de fibra óptica de este valor para evitar hacer el procesado de señales de los capítulos anteriores.

Se simuló un sistema que está formado por veinte sensores en serie. El propósito de esta simulación es la de comprobar si al formar los sensores con acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.01$, es posible colocar un número mayor de sensores que utilizando un coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.5$.

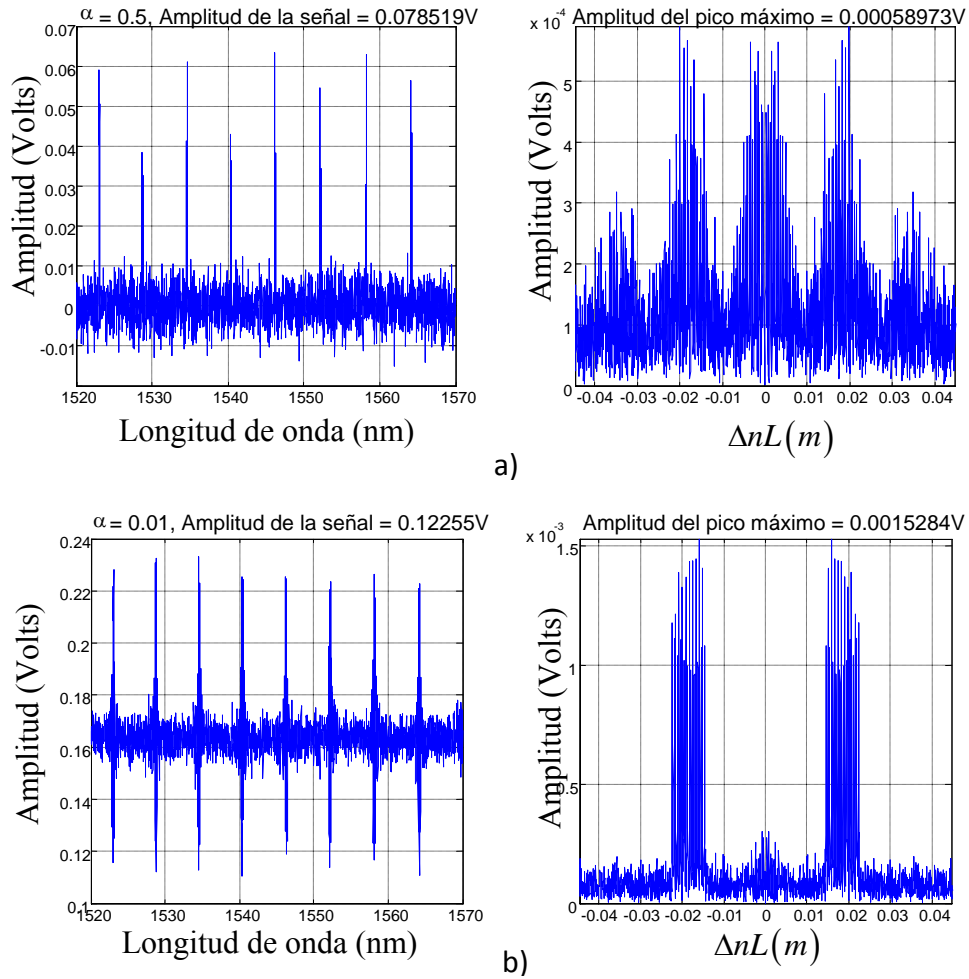


Figura 68. Simulación numérica de señal y espectro de Fourier, para veinte sensores con acopladores de fibra óptica con. a) $\alpha = 0.5$ b) $\alpha = 0.01$.

Si observamos la figura 68 podemos ver que la amplitud de la señal que se muestra en la figura 68b) es mayor que la señal de la figura 68a). Debido a esta mayor amplitud se tendrá una SNR mayor para la señal mostrada en la figura 68b). Por lo que es posible agregar más sensores al sistema utilizando un $\alpha = 0.01$ en comparación con un $\alpha = 0.5$.

Al observar estos resultados de simulación numérica, podemos decir, que es posible utilizar acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.01$ para formar los sensores de fibra óptica. Lo cual permite utilizar todo el espectro de Fourier para colocar más sensores sin preocuparse por los picos parásitos. Por ejemplo, para construir un sistema con sensores formados por acopladores de fibra óptica con $\alpha = 0.01$, con rango dinámico para cada sensor $\Delta T^{\circ} = 100^{\circ}C$, puede usarse un número mínimo de periodos $N_{p\min} = P_{e1} + 10$ para asegurar que el sensor formado por la fibra más corta dé una señal con un mínimo de 10 periodos y la fibra más larga que soporta la resolución del sistema es $L_{S\max} = 150m$.

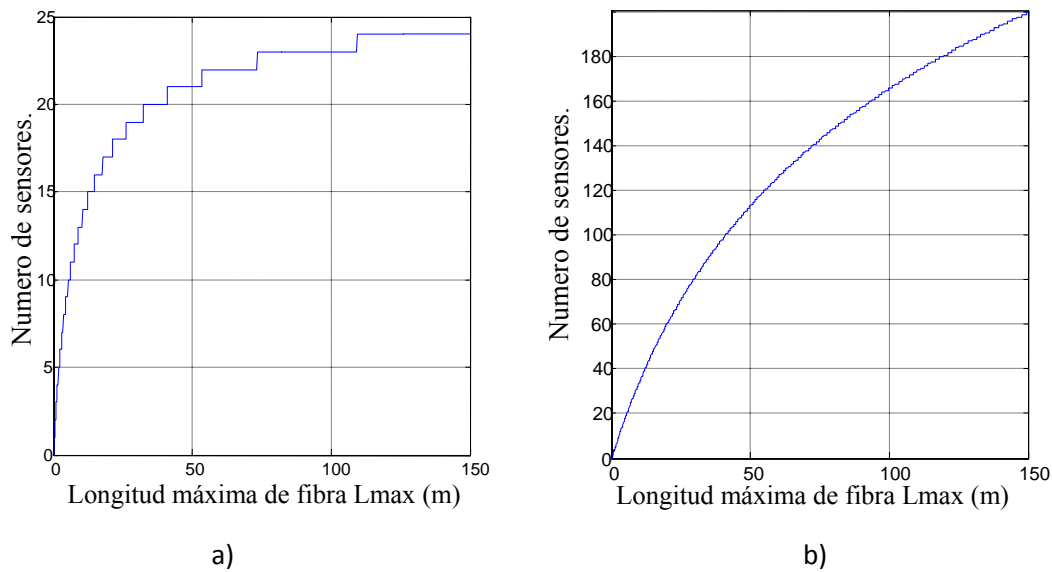


Figure 69. a) Número de sensores con rango dinámico de $100^{\circ}C$. b) Número de sensores con rango dinámico de $10^{\circ}C$. Donde el número mínimo de periodos es $N_{p\min} = P_{e1} + 10$

Si comparamos la figura 69 con la figura 58, podemos observar que en la figura 69 se tiene un número mayor de sensores, debido a que se utilizó mayor parte del espectro de Fourier para colocar sensores.

En las figuras 70a,b) se muestran los espectros de Fourier de la señal de salida de dos sistema sensores, generados por el simulador numérico, diseñados para trabajar con un rango dinámico de temperatura de $\Delta T^\circ = 100^\circ C$, utilizando una fibra de $L_{\max} = 10m$ como sensor más largo en ambos sistemas. En la figura 70a) se muestra que en un sistema con sensores formados por acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.5$, sólo es posible colocar cinco sensores en el sistema a causa de los picos parásitos que se generan y es necesario emplear el procesamiento de señales mostrado en el experimento con cinco sensores. Por otra parte, en la figura 70b) se muestra que al realizar el sistema con sensores, formados por acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.01$, es posible colocar más de cinco sensores en el sistema. Además, el procesamiento de señales se simplifica debido a la eliminación de los picos parásitos.

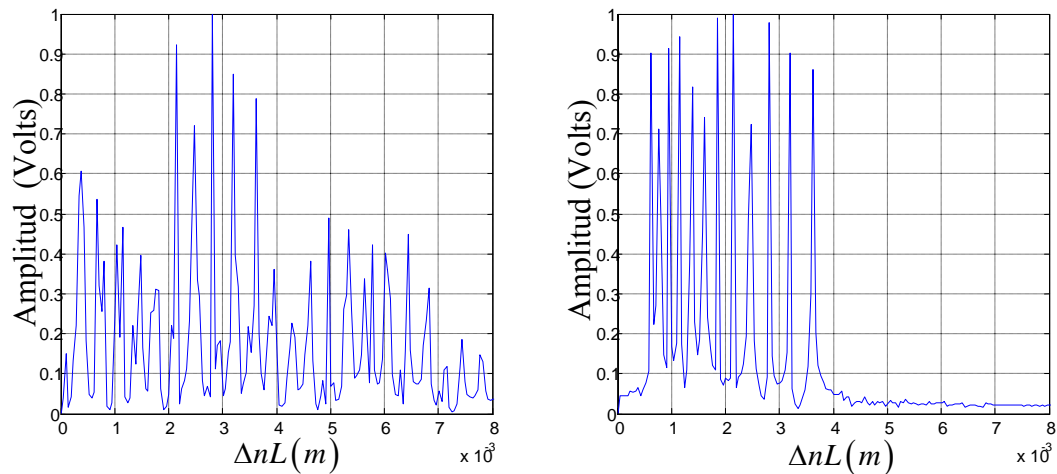


Figure 70. Espectro de Fourier de la señal de simulador numérico para: a) Un sistema de sensores formados por acopladores de fibra con $\alpha = 0.5$. b) Un sistema de sensores formados por acopladores de fibra con $\alpha = 0.01$.

Conclusiones

De este capítulo podemos concluir que el número de sensores que es posible colocar en un sistema está limitado por distintos factores tales como: potencia de entrada, rango dinámico, por el coeficiente de acoplamiento α de los acopladores de fibra óptica, por el ruido de oscuridad de fotodetector, etc.

Al utilizar el simulador numérico y variar el coeficiente de acoplamiento α de los acopladores de fibra óptica observamos que al disminuir α las componentes parásitas disminuyen en su amplitud. Esto puede ser aprovechado para evitar el procesado de señales mostrado en el capítulo IV.4.1. Gracias a esto la técnica de multiplexado puede ser diferente a la mostrada anteriormente, recordando que estos resultados son producto de una simulación numérica, lo que nos permite proponer el uso de acopladores de distinto coeficiente de acoplamiento que los utilizados en los experimentos de este trabajo de tesis. Sin embargo, es prudente que se realicen experimentos donde se utilicen acopladores de fibra con $\alpha = 0.01$ para comprobar los resultados numéricos. De ser esto cierto, la técnica de multiplexado de sensores tendría un empuje significativo, pues el diseño del sistema se realizaría sin preocuparse por tener interferencia entre componentes parásitas y componentes fundamentales. Lo que resulta en un incremento del número de sensores en el sistema.

Como observamos en la figura 54b) el número máximo de sensores para un sistema real con pérdidas es $M = 140$. Por otro lado, en un sistema con un rango dinámico $\Delta T^o = 10^o C$, acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.01$, en el que $N_{p\min} = P_{el} + 10$ periodos y cuando la fibra más larga que soporta la resolución del sistema es $L_{S\max} = 150m$, el número de sensores que es posible colocar en serie es $M = 195$. La conclusión más importante de este capítulo es que el número máximo de sensores que pueden ser colocados en un sistema en serie, con los dispositivos de laboratorio, es aquel que está limitado por SNR y es alrededor de $M = 140$ sensores colocados en serie.

Capítulo VI

Conclusiones

Los resultados de este trabajo de tesis se enumeran a continuación:

1. Se demostró experimentalmente que es posible utilizar la técnica de baja coherencia, en interferómetros de Sagnac, cuando se utiliza la técnica de barrido espectral, utilizando un láser sintonizable y un fotodetector para observar las fluctuaciones de intensidad en la salida del arreglo experimental.
2. Se encontró que al realizar barridos espectrales mediante el uso de láser sintonizable y un fotodetector, se presentan discontinuidades de fase en las señales de los sensores. Esto se resolvió utilizando un interferómetro de referencia para calcular la razón entre el interferómetro sensor y el interferómetro de referencia, de manera que se eliminan los saltos de fase.
3. Se desarrolló un simulador numérico de señales de sensores en serie. El cual fue validado mediante la comparación con resultados experimentales.
4. Se desarrollaron tres metodologías de multiplexado de sensores en serie:
 - a) Se demuestra experimentalmente que al colocar sensores de fibra óptica de longitudes de fibra HBF múltiplos de tres, es posible interrogar a cada sensor por separado sin tener interferencia con alguna frecuencia parásita. Sin embargo este esquema presenta el inconveniente de requerir longitudes de fibra óptica excesivamente largas cuando se requiere un gran número de sensores.

- b) Se demuestra experimentalmente que al escoger cuidadosamente las longitudes de fibra HBF que forman a los sensores, mediante una metodología desarrollada en este trabajo de tesis, en conjunto con el procesamiento de señales desarrollado en este trabajo de tesis, es posible tener acceso a la información que genera cada sensor del sistema. Esta metodología se demuestra experimentalmente con un arreglo de cinco sensores colocados en serie.
- c) Se demuestra numéricamente que es posible eliminar las componentes parásitas, que aparecen en el espectro de Fourier cuando se coloca más de un sensor en serie, mediante la utilización de acopladores de fibra óptica con coeficiente de acoplamiento $\alpha = 0.01$. Con lo cual el número de sensores puede incrementarse significativamente.
5. Se encontró numéricamente que el número de sensores depende de la resolución del sistema, de la SNR (por sus siglas en inglés, Signal to noise ratio) y del rango dinámico de los sensores. Se demuestra numéricamente que para un número determinado de sensores existe una α óptima. Además se demuestra numéricamente que el número máximo de sensores que es posible colocar en un sistema real, con pérdidas de $\alpha_p = (0.85)$, es de alrededor de $M = 140$ sensores en serie. Es necesario mencionar que el número de sensores en un sistema puede aumentar al colocar varios sistemas, de sensores en serie, en paralelo. De esta manera es posible tener un sistema con más de 140 sensores.

Es preciso mencionar que los resultados de esta investigación proporcionarán los principios de diseño necesarios para el desarrollo de sistemas de multiplexado de sensores basados en la interferometría de baja coherencia. Con lo que se pretende que el desarrollo de este tipo de sistemas ayude a la infraestructura de medición en áreas diversas de la ciencia y tecnología. En donde se requiera de un sensor cuasi distribuido o bien de una variedad de sensores en un mismo sistema.

Literatura citada.

A. García- Weidner, C. Torres Torres, A. V. Khomenko, and M. A Garcia-Zarate. 2003. Polarization insensitive linear intensity modulation in a Sagnac fiber-optic loop with an electro-optic cell and optoelectronic feedback. *Optics and Lasers in Engineering* **39**, 567-579p.

A. Yu and A. S. Siddiqui. 1994. Optical modulator using fibreoptic Sagnac interferometers. *IEE Proceedings, Optoelectronics* **141**, 1-7p.

Advanced Technology Transfer Project Bi-National Consortium. Project Summary and Recommendations. UA-CICESE, 2004.

Burns W.K. 1994. *Optical Fiber Rotation Sensing*. Academic Press. Inc. New York. 390p

Chai Yeh. 1990. *Handbook of fibers optics: theory and applications*. Academic Press, Inc. Primera edición. San Diego, CA. 382pp.

D. Monzon, A. N. Starodumov, L. A. Zenteno, A. Boyain y Goitia. E. De la Rosa. 1997. Interferometro de Sagnac con selectividad espectral. *Revista Mexicana de Fisica*. **43**. 6. 972-980p.

D.B.Mortimore. 1988. Fiber loop reflector. *J. of Lightwave Technology*. **6**, 1217- 1224p.

Do-Hyun Kim, and Jin U. Kang. 2004. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity. *Optics Express*, **12**, 19, 4490-4495p.

F.Farahi. N.Takahashi. J. D. C. Jones and D. A. Jackson, 1989. Multiplexed fiber-optic sensors using ring interferometers. *Journal of Modern Optics*, **36**, 3, 337-348p.

Fraden, Jacob, *Handbook of Modern Sensors, designs and applications*, AIP PRESS, 2da edición, New York 1996.

Hecht, Eugene, *Óptica*. ADDISSON WESLEY IBEROAMERICANA, Madrid, 2000.

J. Tapia-Mercado, A. V. Khomenko, A. Garcia-Weidner, and M. A. Garcia-Zarate. 2000. Calorímetro dual de fibra óptica. *Revista mexicana de Física* **46**, 598-601p.

Jackson, D A. 1985. Monomode optical fibre interferometers for precision measurement. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **18**, 12, 981-1001 p.

K. Krakenes, and K. Blotekjaer. 1989. Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties. *Opt. Lett.* **14**, 1152-1154p.

Kuzin, E.A., J. Sanchez-Mondragon, M. A. Basurto-Pensado, B. Ibarra-Escamilla, M. Ramirez-Renero. 1997. Fiber optic polarimetric type sensors based on the loop interferometer. *Optik*. **106**, 4, 172-174p.

M. J. Marrone, R. D. Esman, and A. D. Kersey. 1993. Fiber-optic magnetic field sensor with an orthoconjugating loop mirror. *Opt.Lett.* **18**, 1556-1558p.

P.T.Beyersdorf, M. M. Fejer and R. L. Byer. 1999. Polarization Sagnac interferometer with postmodulation for gravitational-wave detection. *Opt Lett* **24**. 1112-1114p.

Sleeh, Bahaa E.A., Teich, Malvin Carl. 1991. Fundamentals of photonics. Capítulo 8. Fiber Optics. Wiley. New York. 966pp.

Stokes, L.F., M.Chodorow, and H.J.Shaw. 1982. All-single-mode fiber resonator. *Optics Lett.* **7**, 6, 288-290p.

Tapia Mercado Juan Crisóstomo, “Sensores de fibra óptica basados en la Interferometría de baja coherencia”, Tesis, 2001, B.C. México.

Ulrich, R, M. Johnson. 1979. Fiber-ring interferometer: Polarization analysis. *Optics Lett.* **4**, 5, 152-154p.

X. Fang, and R. O. Claus. 1995. Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer. *Opt. Lett.* **20**, 2146-2148p.

X. Fang, H. Ji, L. J. Pelz. 1997. A compound High – order Polarization- Independent Birefringence Filter Using Sagnac Interferometers. *IEEE photon Technol Lett* . **9**, 458p.