



**TECNOLOGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.

REPORTE DE RESIDENCIA PROFESIONAL

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA

PROYECTO:

**“SENSOR DE TEMPERATURA RATIOMÉTRICO BASADO
EN FIBRA MULTINÚCLEO”**

PRESENTA:

MONSERRAT DEL CARMEN ALONSO MURIAS

ASESOR INTERNO:

M.C. RAÚL MORENO RINCÓN

ASESOR EXTERNO:

DR. DANIEL ALBERTO MAY ARRIOJA

CO-ASESOR EXTERNO:

IVÁN HERNÁNDEZ ROMANO

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS A DICIEMBRE 2015

CONTENIDO

CAPITULO 1.....	iv
1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	7
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	8
1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	8
CAPITULO 2.....	9
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE SE PARTICIPÓ	10
2.1.1. MISIÓN	10
2.1.2. VISIÓN	10
2.1.3. ORGANIGRAMA GENERAL.....	10
2.1.4. ÁREA DE TRABAJO.....	12
2.2. PROBLEMAS A RESOLVER PRIORIZÁNDOLOS.....	13
2.2.1. CRONOGRAMA	13
2.2.2. DESCRIPCIÓN DETALLA DE LAS ACTIVIDADES A REALIZAR	14
2.3. ALCANCES Y LIMITACIONES	15
2.3.1. ALCANCES	15
2.3.2. LIMITACIONES	15
CAPITULO 3.....	16
3.1. FUNDAMENTO TEÓRICO	17
3.1.1. GUIAS DE ONDA.....	17
3.1.2. FIBRAS ÓPTICAS.....	17
3.1.3. TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS.....	18
3.1.4. ACOPLAMIENTO ENTRE GUIAS DE ONDA	19
3.1.5. INTERFEROMETRÍA GENERAL	20
3.1.6. INTERFEROMETRO DE MACH-ZEHNDER	20
3.1.7. FIBRAS MULTINÚCLEO (3 NÚCLEOS).....	21
3.1.8. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....	22
3.1.8.1. SENSORES EXTRÍNSECOS	23
3.1.8.2. SENSORES INTRÍNSECOS	23
3.1.9. SISTEMA DE INTERROGACIÓN RATIONOMÉTRICA	24

3.1.10.	MEDIDA RATIONOMÉTRICA	25
3.1.11.	DISPOSITIVOS Y EQUIPOS ÓPTICOS.....	25
3.1.11.1.	SLD1550S-A2.....	25
3.1.11.2.	LDC220C	25
3.1.11.3.	TED200C	25
3.1.11.4.	LM14S2.....	26
3.1.11.5.	CONTROLADOR DE POLARIZACIÓN.....	26
3.1.11.6.	THERMO SCIENTIFIC SUPER-NUOVA	26
3.1.11.7.	ANRITSU MS9740A	26
3.1.11.8.	ANRITSU TUNICS PLUS	26
3.1.11.9.	ACOPLADOR DE VENTANA DUAL 1X2 50/50	26
3.1.11.10.	THORLABS PDA10CS	27
3.1.11.11.	TECKTRONIX TDS 2004B.....	27
3.1.11.12.	FITEL S178.....	27
3.1.11.13.	CONECTOR FC/APC MONOMODO SIMPLEX.....	27
3.1.11.14.	ADAPTADOR CUADRADO FC A FC MONOMODO SIMPLEX.....	27
CAPITULO 4.....		28
4.1.	PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	29
4.1.1.	FABRICACIÓN DE LOS SENSORES CON LA FIBRA MULTINÚCLEO	29
4.1.2.	ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA	30
CAPITULO 5.....		35
5.1.	RESULTADOS.....	36
5.2.	CONCLUSIÓN	39
5.3.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
5.4.	ANEXO	41

CAPITULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sensores basados en fibras ópticas han tomado gran importancia para el sensado de una amplia gama de parámetros en diversas aplicaciones, para ello es fundamental que estos sensores sean sensibles a los cambios del parámetro sensado.

Uno de los parámetros fundamentales a sensar es la temperatura pues se considera con mayor influencia en diversos sectores, quien ha permitido generar numerosas investigaciones para desarrollar métodos para medir la temperatura con precisión, a lo que los sensores de fibras ópticas han probado ser una alternativa considerablemente confiable. Dentro de las cualidades a destacar de los sensores de fibra óptica es su inmunidad a la interferencia electromagnética, su tamaño pequeño y su alta sensibilidad. Para el desarrollo de un sensor de fibra óptica es necesario mejorar su sensibilidad, esto se logra modificando la fibra óptica de tal manera que el modo óptico interactúe con el material externo. Los diferentes métodos que existen para lograr esta modificación se vuelven tanto costosas y difíciles de manipular, debido a ello se propone como alternativa para la fabricación de sensores de fibras ópticas la utilización de fibra multinúcleo,

El contenido de este escrito es en base al desarrollo de un sensor de temperatura ratiométrico basado en fibra multinúcleo, el cual es abordado en una estructura de cinco capítulos.

En el capítulo uno se describe la justificación, así como los objetivos que se asumió para el desarrollado del sensor, del cual se logró llegar al objetivo general propuesto a través de cada objetivo específico. Para el capítulo dos se encuentra la descripción del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., lugar en el que se participó con la realización del proyecto, así mismo se detallan las actividades a realizar a partir de los problemas planteados a resolver, en conjunto con los alcances y limitaciones que se tuvo.

El desarrollo del proyecto es importante que sea fundamentada con teoría, por ello en el capítulo tres, se describe los principales y fundamentales conceptos que se requirieron conocer para la realización, como por ejemplo su principio de funcionamiento de la fibra multinúcleo el cual se basa en el acoplamiento entre guías de ondas, así también implementado esta fibra a una estructura trabaja como un interferómetro de Mach-Zehnder y para el sensado de temperatura se necesita tener una señal modulada, la cual varía cada vez que interactúa con el medio a sensar.

Para el capítulo cuarto se aborda el procedimiento y descripción de las actividades realizadas, desde la explicación del proceso de fabricación que se utilizó para los sensores de temperatura hasta el arreglo experimental con el que se probaron los sensores.

En el desarrollo se buscó obtener una respuesta del sensor bastante buena, logrando que fuese bastante sensible así bien se implementaron métodos en la medición que permitieron resultados precisos y evitando tener errores que perjudicarán al resultado final, en el capítulo cinco son expuestos dichos resultados, así bien se presenta la conclusión que se obtuvo a partir del análisis de los resultados obtenidos. En este mismo capítulo en el apartado de anexos se presentan imágenes que se obtuvieron en el transcurso de la realización del proyecto.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La medición de temperatura es un factor importante para diferentes aplicaciones tanto de investigación como industriales, y los sensores de fibra óptica ofrecen numerosas ventajas para la medición de este parámetro.

El problema principal cuando se desarrollan sensores de fibra óptica para medir temperatura es que el coeficiente termo-óptico de las fibras ópticas es en general muy pequeño, en el orden de 10^{-6} , lo que hace a las fibras bastante insensibles a variaciones de temperatura.

Con el fin de mejorar la sensibilidad térmica de las fibras, éstas tienen que ser modificadas para lograr que el modo óptico interactúe con un material externo con un coeficiente termo-óptico más grande.

Existen diferentes opciones para lograr esta interacción, se encuentran el de remover la cubierta de la fibra óptica para exponer el núcleo de la fibra, así como adelgazar la fibra en ciertas secciones (tapering); sin embargo, estas modificaciones pueden ser ya sea complicadas o que requieran el uso de equipo muy costoso.

Por lo que se propuso el uso de fibras multinúcleo para mejorar la sensibilidad del sensor de fibra óptica de temperatura mediante la adquisición de medidas ratiométricas, la particularidad de esta fibra multinúcleo es que consta en su estructura interna de tres núcleos que se encuentran muy cercanas entre sí una de la otra.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseño, fabricación y prueba de Sensores de Fibra Óptica basados en fibras multinúcleo para la medición de temperatura empleando técnicas ratiométricos.

1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS

1. Familiarizarse con el concepto de guías de onda, y de fibras ópticas en particular.
2. Conocer los fundamentos de los sensores de fibra óptica comunes.
3. Desarrollar habilidades numéricas que permitan la simulación de fibras multinúcleo mediante el empleo de software especializado (COMSOL Multiphysics).
4. Desarrollar habilidades experimentales que permitieran la fabricación de dispositivos basados en fibras ópticas.
5. Diseño, fabricación y prueba de sensores de fibra óptica basados en fibras multinúcleo para la medición de temperatura empleando técnicas ratiométricas.

CAPITULO 2

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE SE PARTICIPÓ

El proyecto se realiza dentro del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., ubicada en Lomas del Bosque 115, Lomas del Campestre, de la Ciudad de León, Guanajuato. Que precede la Dirección General por el Dr. Elder de la Rosa Cruz.

2.1.1. MISIÓN

El Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. es un centro público cuyo propósito es desarrollar investigación básica y aplicada en el campo de la óptica y fotónica, que contribuya a los esfuerzos de la comunidad científica para impulsar las fronteras del conocimiento y su aplicación en el sector productivo y social del país, además de la formación de recursos humanos de alto nivel, el desarrollo y la transferencia de tecnología, y la contribución de una cultura científica y tecnológica en la sociedad mexicana. Contribuir al conocimiento científico, a través de la investigación teórica y experimental en óptica y disciplinas afines, fortalecer la capacidad científica y tecnológica del país, a través de programas de especialidad y posgrados de calidad internacional, contribuir al crecimiento tecnológico del país, a través del desarrollo y la transferencia de tecnología en la sociedad mexicana, a través de la divulgación y difusión del conocimiento científico.

2.1.2. VISIÓN

Ser un Centro de investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica y fotónica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología de nuestro país.

2.1.3. ORGANIGRAMA GENERAL

A continuación se presenta el organigrama del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.:

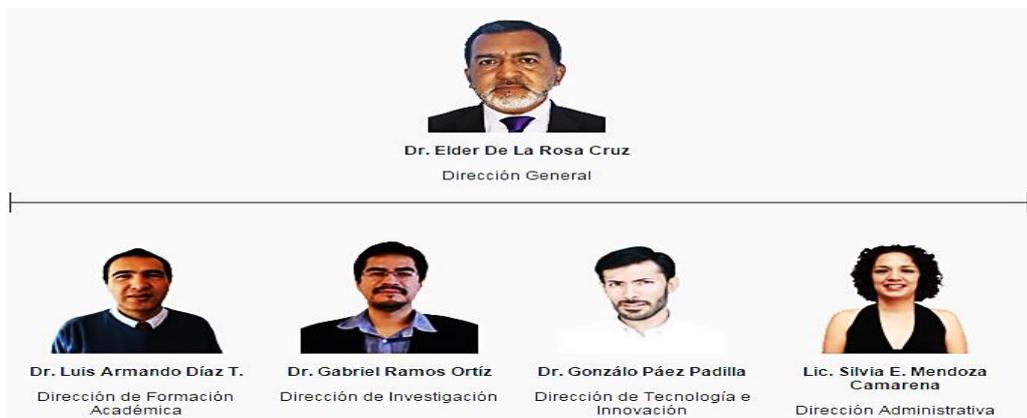


Fig. 2.1. Organigrama general del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

En el siguiente organigrama se detalla la estructura de la Dirección de Investigación por el Dr. Gabriel Ramos Ortiz



Fig. 2.2. Organigrama de la dirección de investigación del CIO

2.1.4. ÁREA DE TRABAJO

Se participa dentro del Grupo de Sensores Ópticos y Microdispositivos en el Laboratorio de Fibras y Óptica Integral dentro del Edificio A (Ver Fig.2.3), en sus líneas de investigación se encuentra el desarrollo de sensores y biosensores, para el monitoreo de diferentes parámetros, bajo la asesoría del Dr. Daniel Alberto May Arriola y el Dr. Iván Hernández Romano.



Fig. 2.3. Croquis del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

2.2. PROBLEMAS A RESOLVER PRIORIZÁNDOS

2.2.1. CRONOGRAMA

ACTIVIDAD	SEMANA															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Revisión bibliográfica	X															
2. Conocimiento de equipo de laboratorio	X	X	X													
3. Modelado de fibras multinúcleo, en particular fibra de dos y tres núcleos.			X	X												
4. Desarrollo de los procesos de fabricación del sensor.					X	X										
5. Arreglo experimental para realizar las pruebas de temperatura							X	X	X							
6. Fabricación y prueba de sensores de temperatura.									X	X	X					
7. Optimización y prueba de los sensores basados en resultados experimentales.												X	X	X	X	
8. Preparación de resultados	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
9. Conclusiones	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10. Redacción de reporte															X	X

2.2.2. DESCRIPCIÓN DETALLA DE LAS ACTIVIDADES A REALIZAR

1. Fue necesario antes de comenzar se tomará tiempo para revisar los fundamentos de las fibras ópticas y su uso como sensores de índice de refracción y temperatura, conocer cuál es el estado del arte de la técnica para tomar experiencia de lo que se ha hecho hasta el momento.
2. Es indispensable que se tuviese conocimiento del manejo del equipo de laboratorio, para esto se llevó a cabo un entrenamiento en cada uno de ellos pero también debe revisar los manuales del equipo.
3. Se aprendió los procedimientos de manipulación y preparación de fibras ópticas. Este conocimiento permitió el desarrollo de los procesos de fabricación que se requieran en la elaboración del sensor.
4. El desarrollo del arreglo experimental para la medición de temperatura.
5. Durante esta etapa se realizó la fabricación y prueba de los sensores.
6. En base a los resultados experimentales anteriores se pudo modificar el diseño del sensor con el fin de optimizar y maximizar la sensibilidad del sensor.

2.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

2.3.1. ALCANCES

El desarrollo del proyecto es de gran importancia para el grupo de investigación en el que se realizó ya que con los resultados obtenidos se abren nuevos campos de investigación del tema, además el dispositivo es un sensor para determinar temperaturas que es factible su aplicación para algún proceso industrial donde se requiera medir el intervalo de temperatura al cual fue diseñado.

2.3.2. LIMITACIONES

La realización del modelado de la fibra multinúcleo por medio un simulador no fue factible realizarlo en el desarrollo del proyecto ya que se requería de un asesoramiento en la materia lo que implicaba tiempo para el dominio del simulador además de un conocimiento previo en el tema.

Durante la realización de las mediciones de temperatura con los sensores se vio afectada en la parte de la utilización de los equipos ya que no se encontraban disponibles todo el tiempo que se deseaba utilizar por lo que se interrumpía las pruebas por cierto tiempo.

En la fabricación de los sensores se requirió de mucho cuidado ya que solo se contó con 1 metro de fibra multinúcleo, si se hacía mal uso de ella el proyecto se vería finalizada sin llegar al objetivo final.

Las mediciones automáticamente por LabVIEW no se pudieron realizar debido a los equipos de medición ya que no se contaba con las librerías necesarias para la comunicación con la computadora, añadiendo también la inestabilidad de la placa calentadora el cual requería de un tiempo variante y prolongado para que se estabilizará a la temperatura deseada, debido a estos factores se optó por realizar las mediciones de manera directa ya que si no se obtendría mediciones con errores, y en el desarrollo del proyecto se buscaba la mayor exactitud posible.

CAPITULO 3

3.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1.1. GUIAS DE ONDA

Instrumentos ópticos convencionales hacen uso de la luz que se transmite entre diferentes ubicaciones en forma de vigas que son colimadas, retransmitidos, enfocado, o escaneado por espejos, lentes y prismas. Haces ópticos difractan y amplían, pero pueden ser reorientado por el uso de lentes y espejos. Aunque estas vigas son fácilmente obstruidos o dispersos por diversos objetos, esta forma de transmisión en el espacio libre de la luz es la base de la mayoría de los sistemas ópticos.

Hay una tecnología relativamente nueva para la transmisión de luz a través de conductos dieléctricos, la óptica de onda guiada. Se ha desarrollado para proporcionar la transmisión de luz a larga distancia sin el uso de lentes de relé. La óptica de onda guiada tiene importantes aplicaciones en dirigir la luz a lugares de difícil acceso, en el establecimiento de comunicaciones seguras, y en la fabricación de dispositivos ópticos y optoelectrónicos miniaturizados que requieren el confinamiento de la luz.

El concepto básico de confinamiento óptico es bastante simple. Óptica Integrada es la tecnología de integración de diversos dispositivos y componentes ópticos para la generación, el enfoque, la división, la combinación, el aislamiento, la polarización, el acoplamiento, el cambio, la modulación y la detección de la luz, todo en un solo sustrato (chip).

Existen tipos de guías de ondas entre las que destacan las rectangulares que se utilizan ampliamente en la óptica integrada y las guías de ondas cilíndricas, que se utilizan para fabricar fibras ópticas, dispositivos integrados-óptica (tales como láseres semiconductores y detectores, moduladores, y conmutadores).

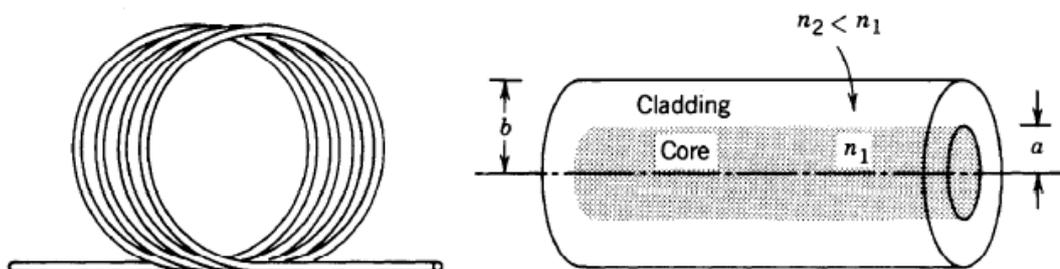


Fig. 3.1 Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica cilíndrica.

3.1.2. FIBRAS ÓPTICAS

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica cilíndrica hecha de materiales de baja pérdida, como el vidrio de sílice. Cuenta con un núcleo central en el que se guía la luz, incrustado en un revestimiento exterior de índice de refracción ligeramente inferior.

Los rayos de luz incidente en la frontera entre el núcleo-revestimiento en ángulos mayores que el ángulo crítico se someten a la reflexión interna total y son guiados a través del núcleo sin refracción. Rayos de mayor inclinación al eje de la fibra pierden parte de su poder en el revestimiento en cada reflexión, y no son guiados.

El principio de la transmisión de luz en fibras ópticas se basa en que la luz introducida en la guía de onda se propaga en forma de modos. Cada modo se desplaza a lo largo del eje de la guía de onda con una constante de propagación distintas y velocidad de grupo, manteniendo su distribución espacial transversal y su polarización. Cada modo era la suma de las múltiples reflexiones de una onda rebotando dentro de la losa en la dirección de un rayo óptico en un cierto ángulo de rebote.

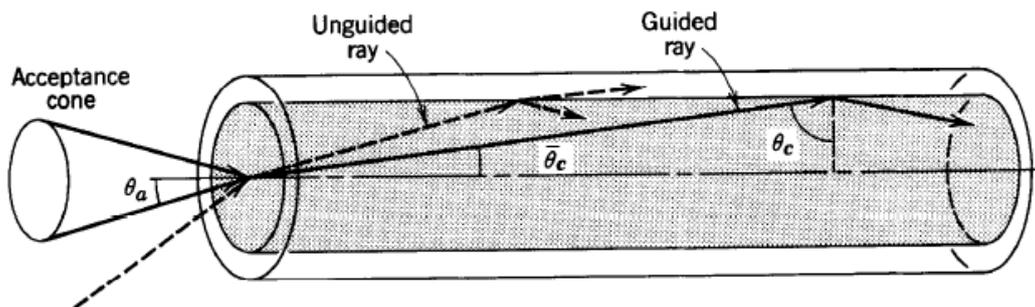


Fig. 3.2. Estructura y principio una fibra óptica de la transmisión de luz de fibra óptica.

3.1.3. TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS

Las fibras ópticas se clasifican como paso índice o índice gradual y multimodo o monomodo.

Cuando el diámetro del núcleo es pequeño, sólo se permite un único modo y la fibra se dice que es una fibra de modo único. Las fibras con diámetros de núcleo grandes son fibras multimodo.

Las fibras convencionales con índices de refracción constantes en el núcleo y el revestimiento, se llaman fibras de salto de índice.

Una de las dificultades asociadas con la propagación de la luz en las fibras multimodo surge de las diferencias entre las velocidades de grupo de los modos.

En una fibra de índice gradual la velocidad aumenta con la distancia al eje del núcleo (ya que el índice de refracción disminuye). Aunque los rayos de

mayor inclinación al eje de la fibra deben viajar más lejos, viajan más rápido, por lo que se igualan los tiempos de viaje de los diferentes rayos. La mayor parte de la atención en la tecnología de sensores está puesta en las fibras salto de índice, tanto monomodo y multimodo. Fibras de salto de índice tienen un índice de refracción que es constante en el núcleo y el revestimiento.

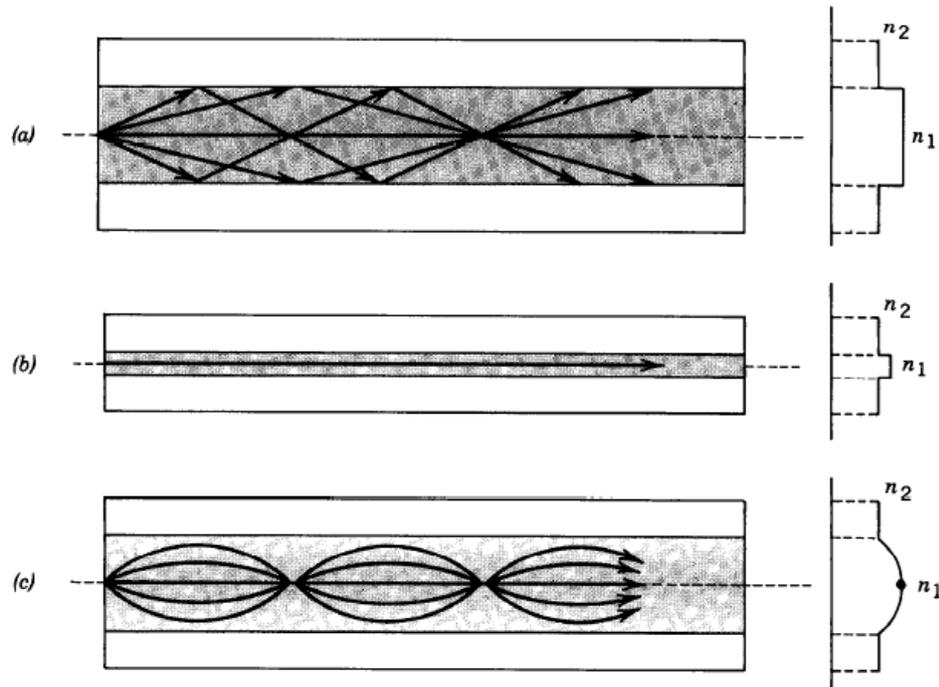


Fig. 3.3. Geometría, perfil índice de refracción, y tipos de rayos en: (a) una fibra multimodo salto de índice, (b) una fibra monomodo salto de índice, y (c) una fibra multimodo índice gradual.

3.1.4. ACOPLAMIENTO ENTRE GUIAS DE ONDA

Si dos guías de onda son suficientemente próximas de tal manera que sus campos se solapan, la luz puede ser acoplada desde uno en el otro. La potencia óptica se puede transferir entre las guías de ondas, un efecto que puede ser utilizado para hacer acopladores ópticos e interruptores.

El acoplamiento cruzado implica la transferencia de la luz de una fibra adyacente a otra. El grado de acoplamiento entre dos fibras adyacentes en estrecha proximidad es una función de los siguientes aspectos: el diámetro de las fibras; la separación entre las fibras; la longitud en la que las fibras están en estrecha proximidad; el índice del núcleo de la fibra, el revestimiento y el índice de los medios circundante; el espesor del revestimiento; la longitud de onda de la luz en la fibra; y los modos particulares excitado en la fibra.

Considérese dos guías de onda planas paralelas hechas de dos tablas de anchos d , separación $2a$, e índices de refracción n_1 y n_2 incrustados en un medio de índice de refracción n ligeramente más pequeño que n_1 y n_2 , como se ilustra en la Fig. 3.4. Cada una de las guías de ondas se supone que es de modo único. La separación entre las guías de ondas es tal que el campo óptico fuera de la losa de una sola guía de ondas (en ausencia de la otra) se solapa ligeramente con la losa de la otra guía de onda.

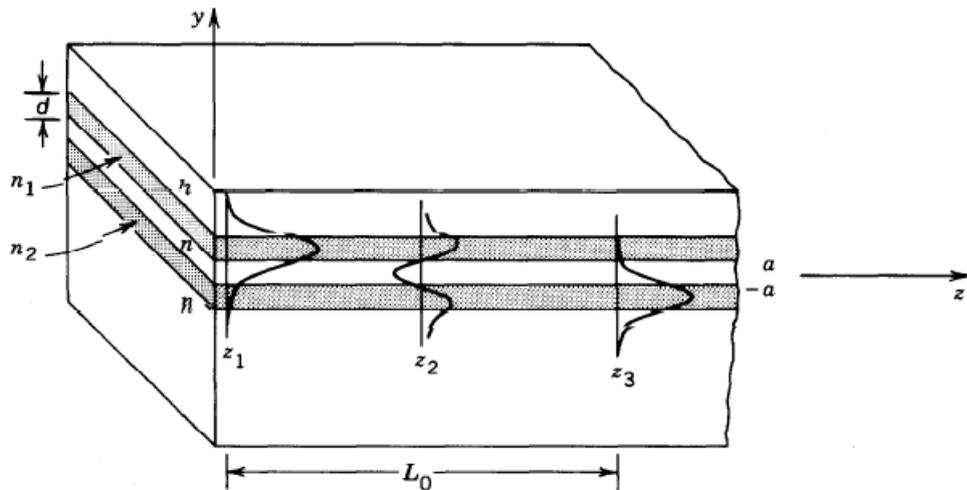


Fig. 3.4. Acoplamiento de dos guías de ondas paralelas.

3.1.5. INTERFEROMETRÍA GENERAL

Cuando dos o más ondas se propagan en el espacio y se encuentran en una región, en cada punto de la región la onda resultante es la suma de dichas ondas. Por lo tanto si tenemos n ondas nombradas u_1, u_2, \dots, u_n que se superponen en una región del espacio, la onda resultante en cualquier punto de esta región viene dada por la siguiente ecuación matemática:

$$u = \sum_{j=1}^n u_j \quad ()$$

Los interferómetros se pueden clasificar según: su arreglo, estructura y función.

- Dos haces: Michelson y Mach Zehnder.
- Múltiples haces: Fabry Perot.

3.1.6. INTERFEROMETRO DE MACH-ZEHNDER

Los interferómetros de doble haz permiten la medición de cambios en la diferencia de fase extremadamente pequeños generados por la perturbación.

La estructura del interferómetro de Mach-Zehnder consta de un módulo de fuente de luz, acoplador, un transductor y un detector como en la Fig. . La salida del láser se divide mediante el uso del acoplador de fibra, 50% de la luz es inyectada en la fibra de detección de modo único y 50% en la fibra de referencia. Los haces de luz se recombinan mediante el uso de un acoplador de fibra y enviados al detector. El haz combinado se detecta y se mide el desplazamiento de fase. Los resultados de desplazamiento de fase de los cambios de longitud y el índice de refracción de la fibra de detección. Si las longitudes de trayectoria de las fibras de detección y de referencia son exactamente la misma longitud o difieren en un número entero de longitudes de onda, los haces recombinados están exactamente en fase y la intensidad del haz está en su máximo. Sin embargo, si los dos haces son de $\frac{1}{2}$ longitud de onda fuera de fase, el haz recombinada está en su valor mínimo.

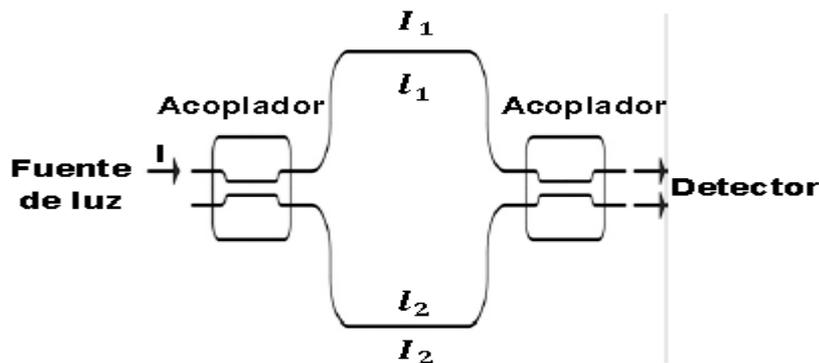


Fig. 3.5. Estructura del interferómetro de Mach-Zehnder.

3.1.7. FIBRAS MULTINÚCLEO (3 NÚCLEOS)

Fibras multinúcleo (MCF) con alta densidad de núcleo y bajo nivel de diafonía han llamado mucho la atención en los sistemas de comunicaciones ópticas. Recientemente, las propiedades especiales de la MCF, tales como tamaño pequeño, la separación del núcleo bien definido, y una buena estabilidad térmica, han dado lugar a mucho interés en sensores de fibra óptica.

Una fibra de tres núcleos puede soportar tres supermodos, pero cuando es excitado por el modo fundamental de SMF como se muestra en la Fig.3.6, sólo actúan dos supermodos. Estos modos interfieren dentro de la sección MCF, produciendo un espectro de transmisión modulada periódicamente.

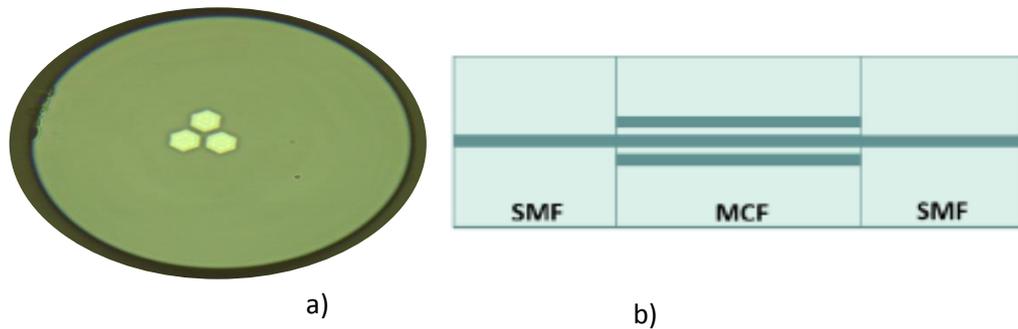


Fig. 3.6. a) Estructura de MCF con tres núcleos. b) Diagrama de excitación del MCF por el modo fundamental de SMF.

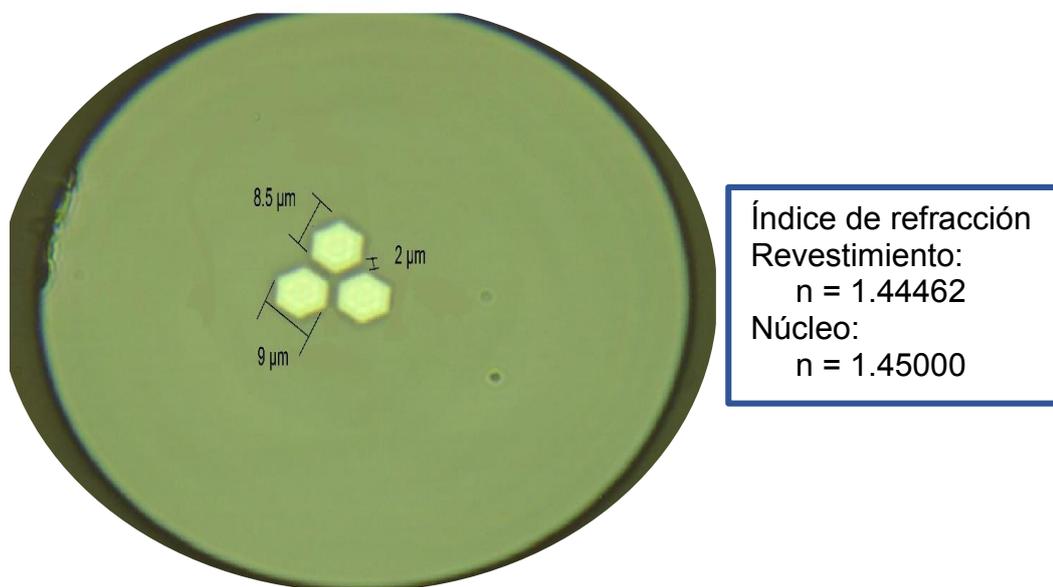


Fig. 3.7. Características de MCF de tres núcleos.

3.1.8. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Las fibras ópticas son ampliamente utilizadas para detectar, cualquier agente externo actuando sobre el dispositivo genera cambios en la transmisión luminosa funcionando con transductor de cambios en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la temperatura, índice de refracción, nivel de líquido, presión, ondas acústicas, tensión, etc.

Cualquier parámetro propio de la luz pueden servir para detectar un cambio, ya sea su amplitud o intensidad, fase, frecuencia y polarización. La utilidad del sensor de fibra óptica dependerá por lo tanto, de la magnitud de este cambio y de su capacidad para medirlo y cuantificarlo en forma repetitiva, confiable y precisa.

Sensores de fibra óptica tienen muchas ventajas, tales como la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la posibilidad de la operación remota y facilidad de fabricación.

En función de cómo se realice la medición de la perturbación externa se clasifican usualmente en dos clases: extrínsecos e intrínsecos.

3.1.8.1. SENSORES EXTRÍNSECOS

Comprende aquellas aplicaciones en las que la fibra actúa solamente como guía de onda llevando luz hasta una “caja negra”, que modula el haz en respuesta al parámetro que se pretende medir. Bajo este enfoque, se modula o imprime la información por algún método particular y la fibra sólo se utiliza para conducir la radiación desde la fuente hacia el dispositivo sensor. Esta información puede estar codificada en intensidad, fase, frecuencia, estado de polarización, contenido espectral [ver Fig.3.8 a)]

3.1.8.2. SENSORES INTRÍNSECOS

Conocidos también como “all-fiber sensors”, utilizan la fibra óptica como guía de onda hasta el lugar donde la magnitud de interés se requiere medir pero la perturbación externa actúa directamente sobre la fibra. La luz permanece dentro de la fibra en todo momento [ver Fig.3.8 b)]

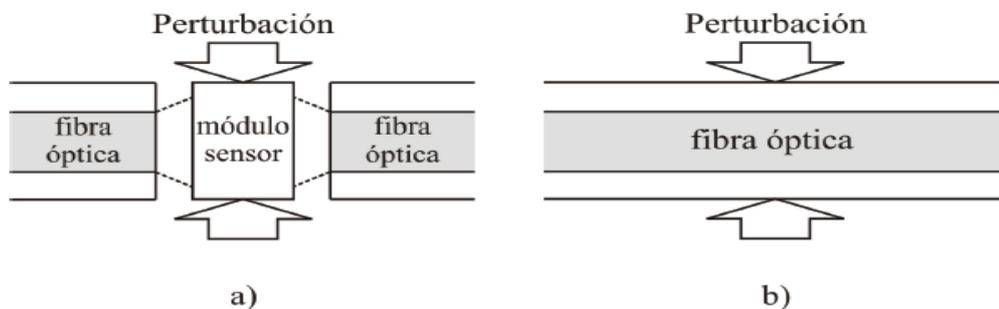


Fig. 3.8. Tipos de sensores de fibra óptica. a) Extrínsecas, b) Intrínsecas.

Sensores de fibra óptica alternativos que operan sobre el principio de interferencia multimodo (MMI) se han mostrado también para medir de forma estable la temperatura. Dispositivos de fibra MMI consisten en una fibra multimodo (MMF) empalmados entre dos fibras monomodo (SMF) como se muestra en la Fig.3.9

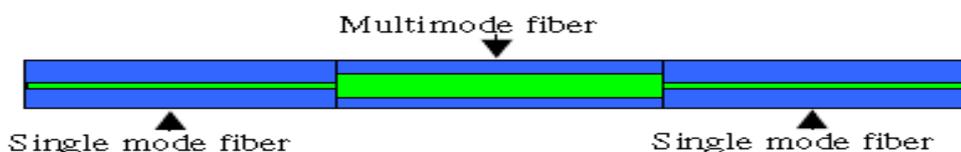


Fig.3.9. Principio de Interferencia multimodo (MMI).

Los sensores interferométricos los han posicionado, por sus propiedades y gran versatilidad en un variado tipo de aplicaciones que van desde simples mediciones de temperatura, hasta el control de grandes estructuras, edificios y en la industria.

En este tipo de sensor, la fibra está en íntima relación con el mecanismo de medición, puesto que la luz puede permanecer dentro del núcleo para interactuar con el campo a medir. La fase óptica de la luz que se propaga es modulada por el parámetro a ser detectado, siendo luego detectada interferométricamente por comparación con la fase de luz de una referencia.

Los sensores basados en fibra multinúcleo (MCF) han tomado una gran importancia debido a su estructura interna, su funcionamiento se basa en el espectro de transmisión del dispositivo de MCF cambia con la temperatura aplicada debido a un cambio en el índice de refracción, de acuerdo con el coeficiente termo-óptico.

3.1.9. SISTEMA DE INTERROGACIÓN RATIOMÉTRICA

Los métodos ratiométricos son una alternativa a la medida de intensidad de emisión que permiten hacer la medida independiente de las principales fuentes de error, como son la dependencia de la luz de excitación o las variaciones en el camino óptico. Un diagrama esquemático de una estructura de fibra multinúcleo (MCF) en un sistema de interrogación ratiométrica se muestra en la Fig.3.10.

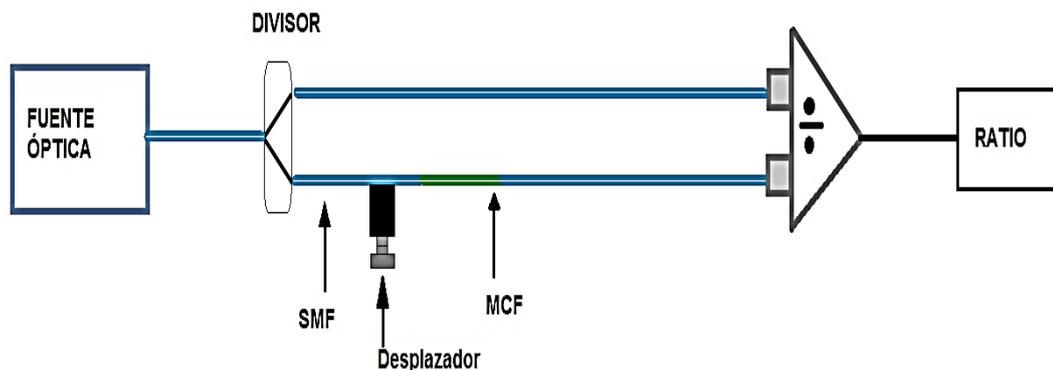


Fig.3.10. Sistema de interrogación ratiométrica.

El sistema consta de una división de la señal óptica de en dos partes: un brazo va directamente a un fotodetector como señal de referencia para compensar las variaciones de potencia en la fuente óptica y otro pasa a través de una estructura de fibra MCF sometido a desplazamiento y es detectada por el segundo fotodetector. Los métodos ratiométricos son una alternativa a la medida de intensidad de emisión que permiten hacer la medida independiente de las principales fuentes de error, como son la dependencia de la luz de excitación o las variaciones en el camino óptico.

3.1.10. MEDIDA RATIOMÉTRICA

Para la obtención de una medida mucho más precisa, para la variación de un parámetro lo más satisfactorio es hacer una medida radiométrica, es decir, el cociente entre la señal recibida por un detector y la que recibe otro detector y no obtener solamente una medición absoluta, esto bien para lograr reducir los efectos de variaciones y eliminando errores.

3.1.11. DISPOSITIVOS Y EQUIPOS ÓPTICOS

3.1.11.1. SLD1550S-A2

Es un diodo súper luminiscente (SLD) que tiene longitud de onda que va de 1450 nm a los 1650 nm, centrada en la longitud onda de 1550 nm, de baja potencia, con una banda ancha cercano al perfil espectral de Gauss y baja ondulación. Se encuentra en un paquete de mariposa de 14 pines estándar con FC / APC conectado. Un termistor integrado permite el control de la temperatura, estabilizando así la potencia y espectro. Cuya corriente de operación típica es de 550mA.

3.1.11.2. LDC220C

Los controladores diodo láser THORLABS Serie LDC200C son de alta precisión inyectando corriente a controladores actuales para diodos láser y LED. El controlador de la serie LDC200C son enfriados por un ventilador interno, que protege la unidad contra sobrecalentamiento en caso de altas temperaturas ambientales. El rango de corriente del LDC220C es de: 0 - 2 A / 4 V.

3.1.11.3. TED200C

El controlador de temperatura termoeléctrica THORLABS TED200C precisa la temperatura del controlador de diodo láser LDC200C y detectores.

3.1.11.4. LM14S2

Es un montaje universal de diodo láser, diseñado específicamente para los diodos láser mariposa de 14 pines, tiene integrado refrigeradores eléctricos térmicos (TEC) y sensores de termistor. Cuando se utiliza con la serie LDC y los controladores de la serie TED de THORLABS, un diodo láser puede funcionar con un control preciso de la temperatura para la estabilidad y la longitud de onda.

3.1.11.5. CONTROLADOR DE POLARIZACIÓN

Un controlador de polarización es un dispositivo óptico para modificar el estado de polarización de la luz.

***F-POL-IL NEWPORT:** controlador de polarización en línea. Puede ser aplicado en un sistema de fibra óptica simplemente insertando una longitud de fibra en la ranura situada en la parte superior del dispositivo.

3.1.11.6. THERMO SCIENTIFIC SUPER-NUOVA

La serie super-nuova con placa calentadora proporciona rendimiento más alto de la gama, seguridad superior y funcionamiento sencillo. Proporcionando una temperatura máxima en la superficie de 370 °C.

3.1.11.7. ANRITSU MS9740A

Es un analizador de espectro que mide la distribución de energía (espectro) de la longitud de onda óptica.

Cuenta con un rango de medición de 0.6 - 1.7 μm .

3.1.11.8. ANRITSU TUNICS PLUS

Láser sintonizable, que permite un rango de sintonía de longitud de onda desde 1430 – 1640 nm, y con una potencia de salida hasta los 12 dB.

3.1.11.9. ACOPLADOR DE VENTANA DUAL 1X2 50/50

Es un elemento óptico de reducido tamaño, posee una entrada y dos salidas, las cuales balancean la señal óptica y la dividen del 100% de entrada en 50% en puerto de salida y 50% en el otro puerto de salida. La longitud de onda de operación es de 1550 nm y tiene una pérdida de 3.25 dB.

3.1.11.10.THORLABS PDA10CS

Es un detector diseñado para la detección de señales de luz sobre un rango de longitud de onda de 900 a 1700 nm. El detector es amplificando a través de la conmutación de la ganancia ya que posee un interruptor giratorio de ocho posiciones permite al usuario variar la ganancia en 10 dB.

3.1.11.11.TECKTRONIX TDS 2004B

Osciloscopio de almacenamiento digital de 60 MHz, con 4 canales. Con un rango de posición de 2mV a 200mV/div +2V; >200mV a 5V/div +50V.

3.1.11.12.FITEL S178

Empalmadora de fibra óptica por fusión. Contando con 150 programas de empalme, así como selección de empalme automática.

3.1.11.13.CONECTOR FC/APC MONOMODO SIMPLEX

El conector FC con un filamento enroscado encaja en el adaptador obteniéndose así una conexión segura. Posee de un rendimiento tanto mecánico como óptico y el APC (conector pulido en ángulo) favorece el acoplamiento entre dos fibras en una superficie inclinada 8 grados, esto permite que las reflexiones de la transición de la luz no retornen al núcleo de la fibra.

3.1.11.14. ADAPTADOR CUADRADO FC A FC MONOMODO SIMPLEX

Acoplador de fibra óptica que permite unir dos conectores, asegurando un perfecto alineamiento, reduciendo así la pérdida en la inserción. Este tipo de adaptador permite facilitar la desconexión y cambio rápido, dispone de conector FC en ambos lados.

CAPITULO 4

4.1. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

Para iniciar con el proyecto se procedió a leer los manuales y hojas de especificaciones correspondientes del equipo y dispositivos a utilizar para su uso adecuado, una vez realizado lo anterior se inició el aprendizaje en la manipulación de la fibra óptica, para ello fue esencial aprender importantes pasos como por ejemplo; quitar el recubrimiento de la fibra mediante pinzas y hojas de navajas, así como el aprendizaje de la cortadora y el uso de la empalmadora.

4.1.1. FABRICACIÓN DE LOS SENSORES CON LA FIBRA MULTINÚCLEO

El diseño propuesto para los dos sensores, se basó en utilizar una fibra multinúcleo especial que fue fabricada con tres núcleos en su estructura, se utilizó a una longitud de 3 cm para el sensor 1 y de 2 cm para el sensor 2, siendo cada una empalmada en los extremos por fibras monomodos (SM) estándar de 9 micras.

Para la fabricación del sensor 1 se comenzó por la preparación de una fibra monomodo (SM) dejando un 1 cm sin recubrimiento [Fig.4.1 (a)], para que fuese empalmada al extremo de la fibra multinúcleo sin recubrimiento [Fig.4.1 (b)]. A partir del empalme se procedió a escindir 3 cm de longitud de la fibra multinúcleo [Fig.4.1 (c)], para finalizar la fabricación del sensor 1 se empalmó fibra monomodo (SM) al extremo cortado de la fibra multinúcleo [Fig.4.1 (d)].

Para la fabricación del sensor 2 se realizó el mismo proceso aplicado con el sensor 1, con la diferencia que escindió la fibra multinúcleo a una longitud de 2 cm a partir del empalme [Fig.4.1 (c)].

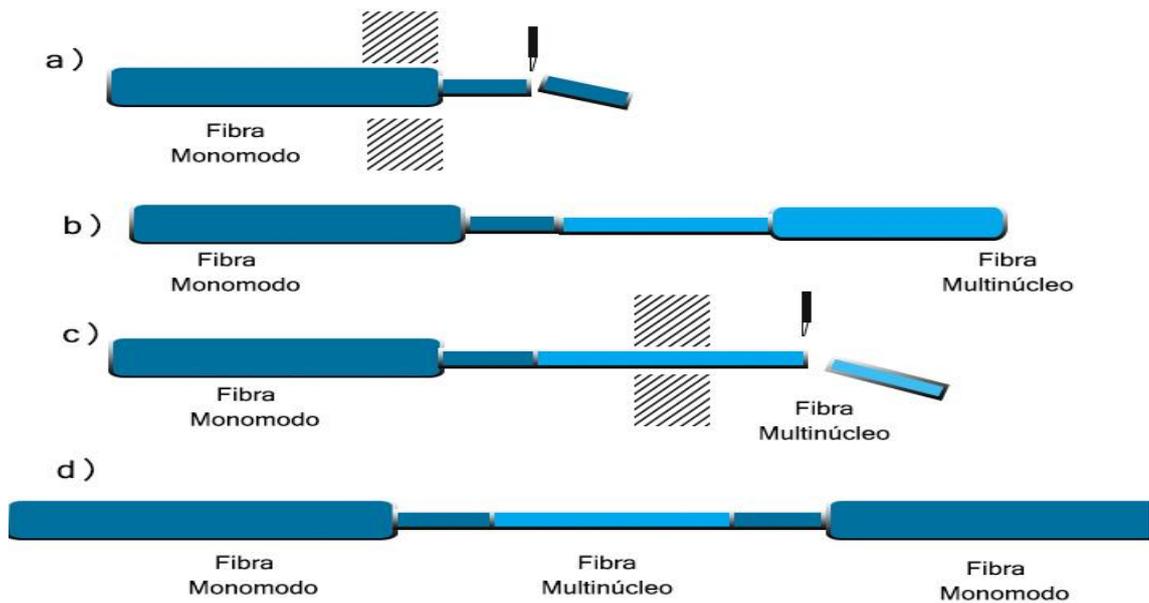


Fig.4.1 Secuencia de la fabricación de los sensores.

4.1.2. ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

La Fig. 4.2 muestra el arreglo experimental que se usó para probar los sensores. Un diodo superluminiscente que se manejó a 350 mA, emite un espectro de emisión que se muestra en la Fig.4.3, la señal se envió hasta un acoplador 1x2 50/50 quien se encargó de dividirla y mandar el 50% de la señal en cada puerto de salida. Las señales de cada puerto fueron guiados por medio de fibra monomodo hasta los controladores de polarización que se encargaron de cambiar la polarización de la luz que entra en la fibra multinúcleo. Los sensores fueron puestos sobre la placa de la plancha quien proporcionó el suministro de la temperatura; y el comportamiento de las señales fueron vistas desde el analizador de espectro.

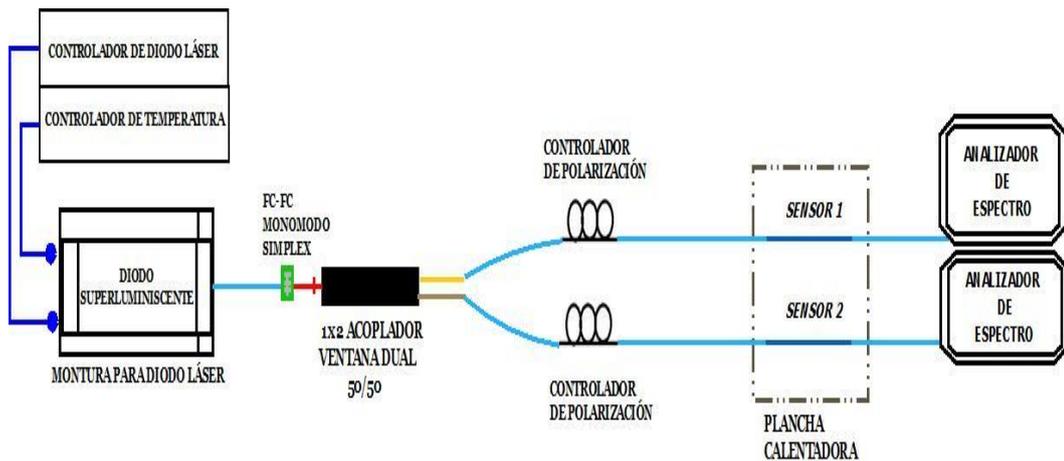


Fig. 4.2. Diagrama del arreglo experimental para la medición de temperatura.

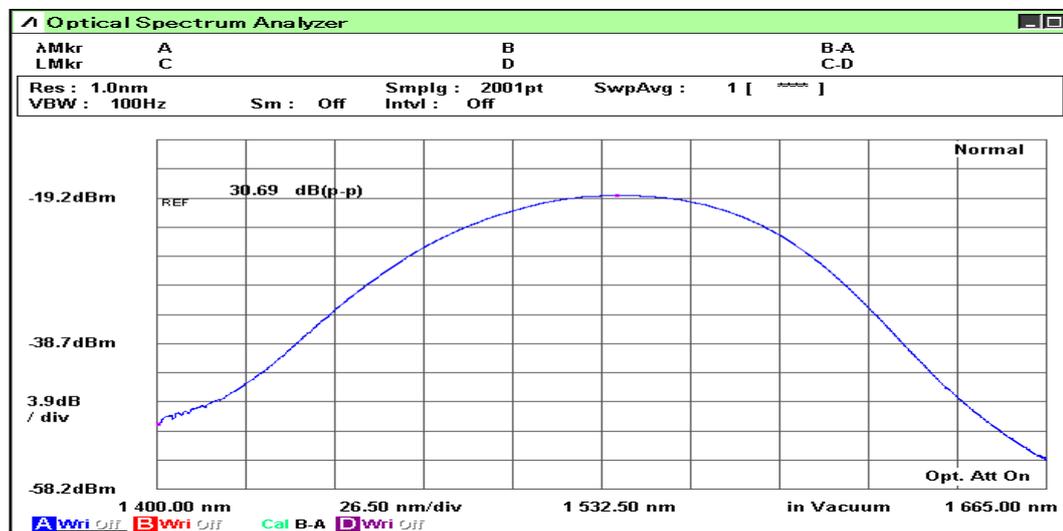


Fig.4.3. Espectro de referencia del diodo láser SLD1550S-A2 obtenida en uno de los analizadores de espectro óptico.

La fibra multinúcleo actúa como un interferómetro Mach-Zehnder (MZI), ya que su principio de funcionamiento se basa en el cambio de fase por diferencia de caminos ópticos entre sus ramas, debido al cambio de índice de refracción.

Al usar el interferómetro de Mach-Zehnder se puede construir un sensor para medir una gran variedad de parámetros físicos: presión, esfuerzo, cambios de índices y temperatura.

El diseño del sensor se basó para la medición del parámetro de temperatura. Al interrogar espectralmente la fibra multinúcleo se obtuvo una señal senoidal, cuyo periodo es inversamente proporcional a la longitud de la fibra multinúcleo tal como se muestra en la Fig.4.4.

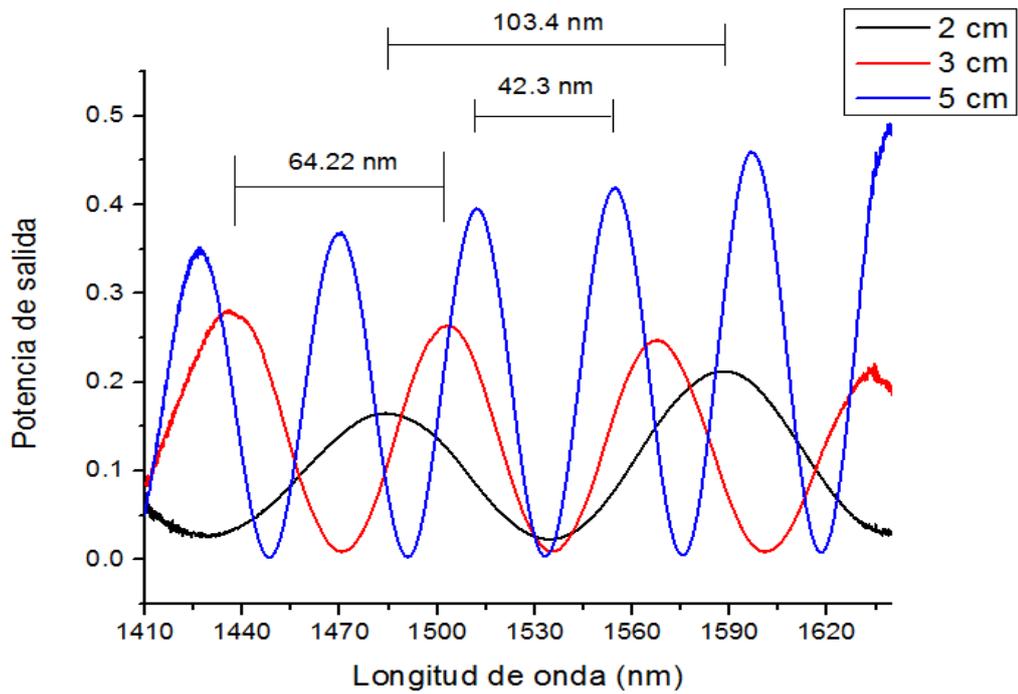


Fig. 4.4. Espectro de la fibra multinúcleo a longitudes de 2,3 y 5 cm con sus respectivos periodos.

El efecto termo-óptico en una fibra monomodo estándar es de $6.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ lo que hace muy insensible a variaciones de temperaturas, el interés surgió en el diseño de un sensor de temperatura que sea sensible a variaciones de este parámetro en un rango de $30 - 190^\circ\text{C}$ como se aprecia en la Fig.4.5.

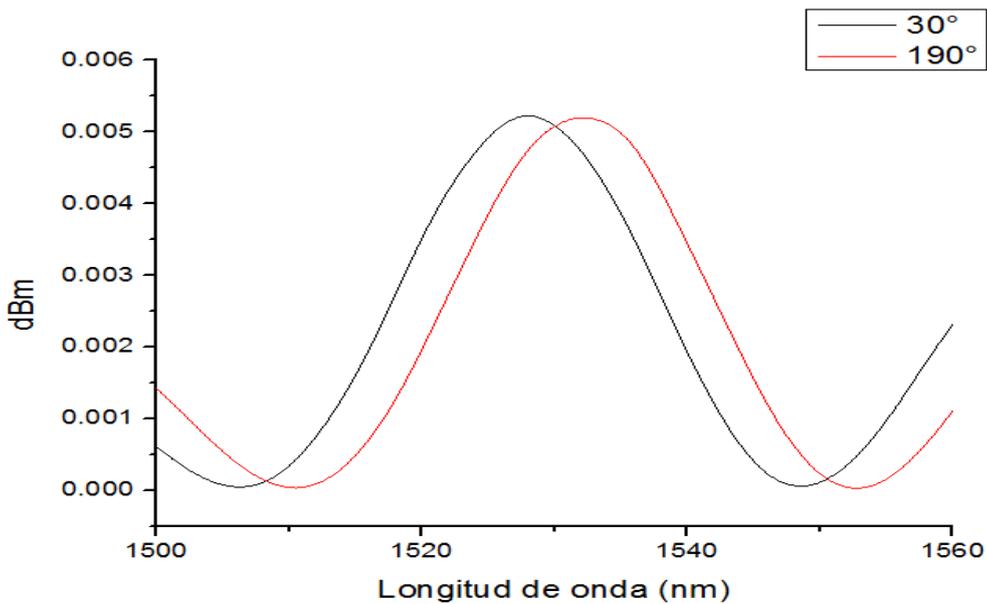


Fig. 4.5. Desplazamiento de la señal por el cambio de temperatura.

La fibra multinúcleo depende su funcionamiento de la polarización de la luz a la entrada de la fibra [Fig.4.5]. Esto se debe a que la constante de acoplamiento entre los núcleos depende fuertemente del estado de polarización. Se pretendía trabajar en una región donde se tuviese una parte lineal de las señales la cual se encontraba entre un máximo y un mínimo, esto permitió que se pudiera medir en potencia y no en longitud de onda.

Por medio de la polarización de la luz se pudo hacer que las dos señales se cruzarán en la parte lineal encontrándose desfasadas a 180° como se muestra en la Fig.4.6. Se obtenía la longitud de onda en el punto de cruce de las señales, a partir de este dato se procedía a desconectar el diodo superluminiscente para poder conectar el láser sintonizable como se visualiza en la Fig.4.7. Al conectar el láser sintonizable se enviaba la longitud de onda de la intercesión con una potencia de 0.8 mW, esto permitía que cuando los sensores comenzarán a censar cada cambio de temperatura sus señales se irían desplazando de tal forma que la potencia transmitida en una fibra aumentaba mientras que la otra disminuía; cuyas potencias eran medidos por un fotodetector.

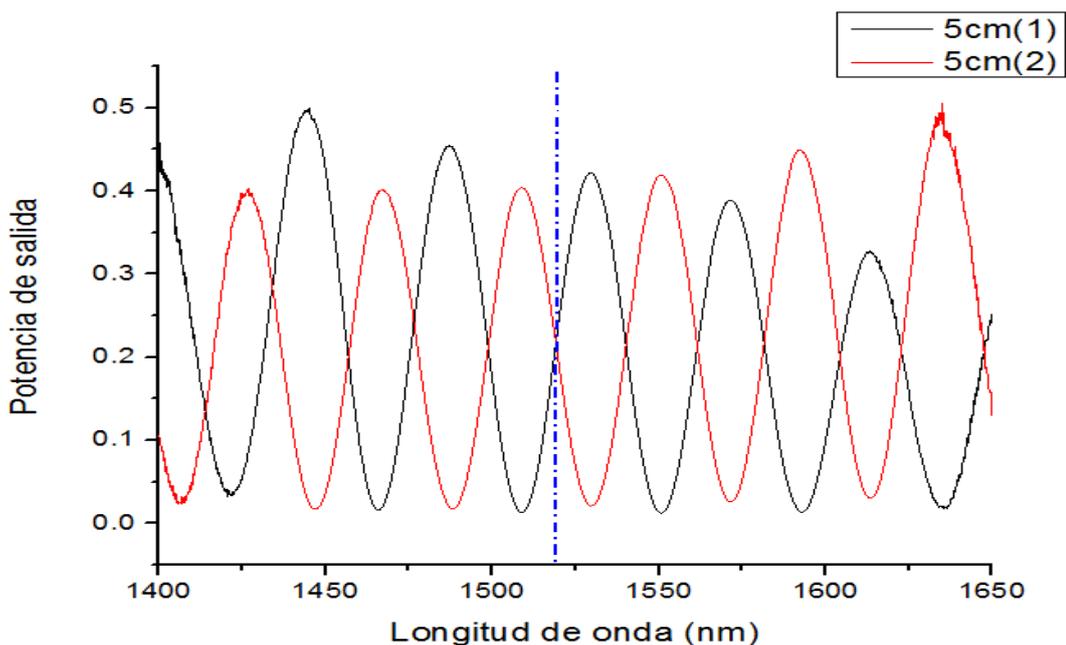


Fig. 4.6 Señales de los dos sensores de temperatura desfasadas 180° uno respecto a la otra, por medio de la polarización de la luz.

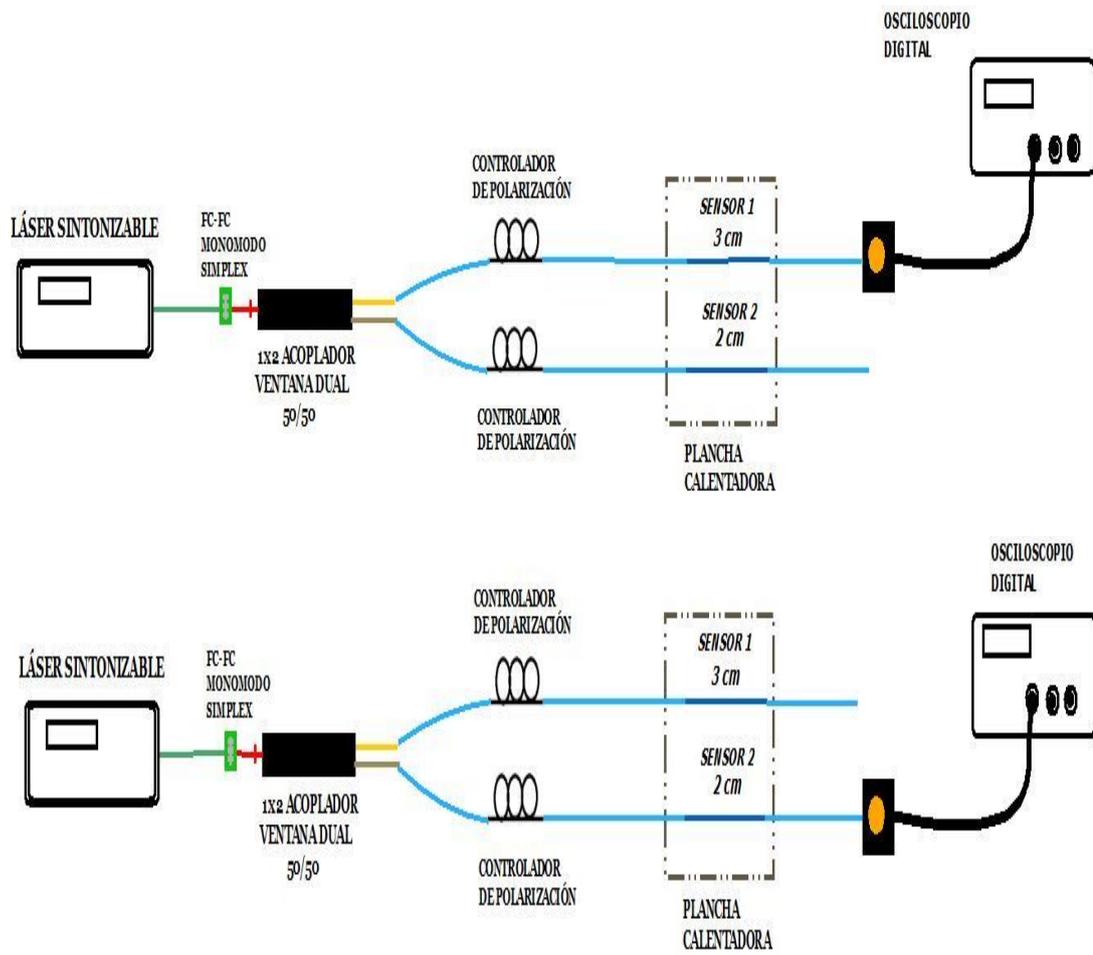


Fig. 4.7. Conexión del láser sintonizable y arreglo experimental para la medición de temperatura.

CAPITULO 5

5.1. RESULTADOS

Se realizó la medición de los cambios de potencia (mW) de las señales de los dos sensores a cada variación de temperatura, las mediciones que se obtuvieron de cada sensor no fueron muy significativas individualmente, por lo que se llevó a cabo el cociente de estas dos mediciones. Cuando se tomaba la razón entre ambas señales, la respuesta era significativamente mayor comparada con cada señal individual. Esto proveía una respuesta mejorada y un cálculo mejor de la sensibilidad del sensor. Se midieron las variaciones de temperatura por medio de dos sensores de longitudes diferentes de 3 y 2 cm cada uno [Fig.5.1].

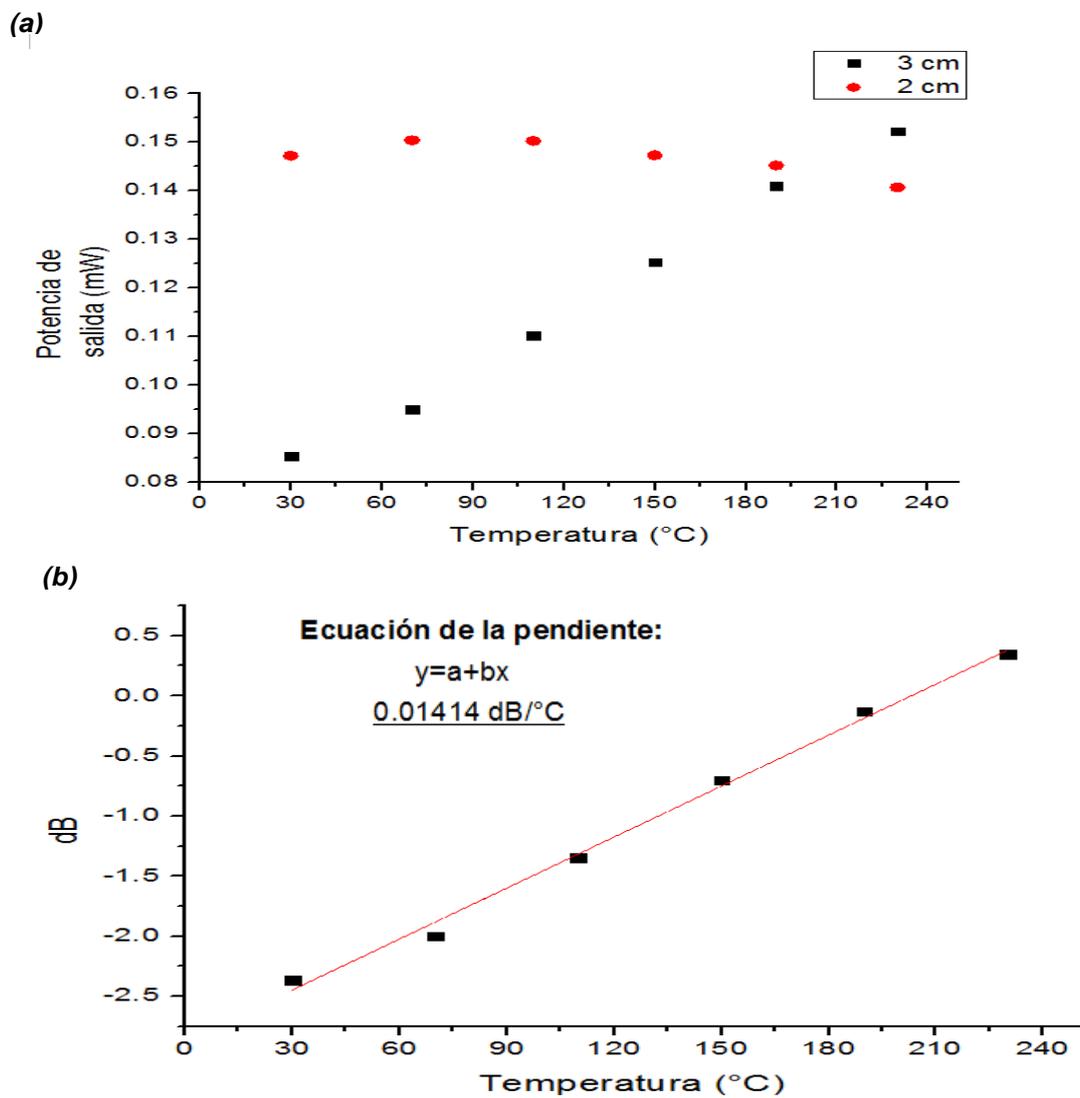


Fig. 5.1. (a) Mediciones de la potencia a los cambios de temperatura con sensor 1 de 3cm y sensor 2 de 2 cm. (b) Pendiente del cociente de las dos señales de los sensores.

Debido a que la función de transferencia es muy diferentes se consideró hacer sensores que tuviesen la misma longitud, logrando obtener una mayor optimización en la respuesta del sensor al cambio de temperatura. Se realizaron las mediciones de temperatura con dos sensores a longitudes de 3 cm cada uno obteniendo las potencias de cada señal [Fig. 5.2].

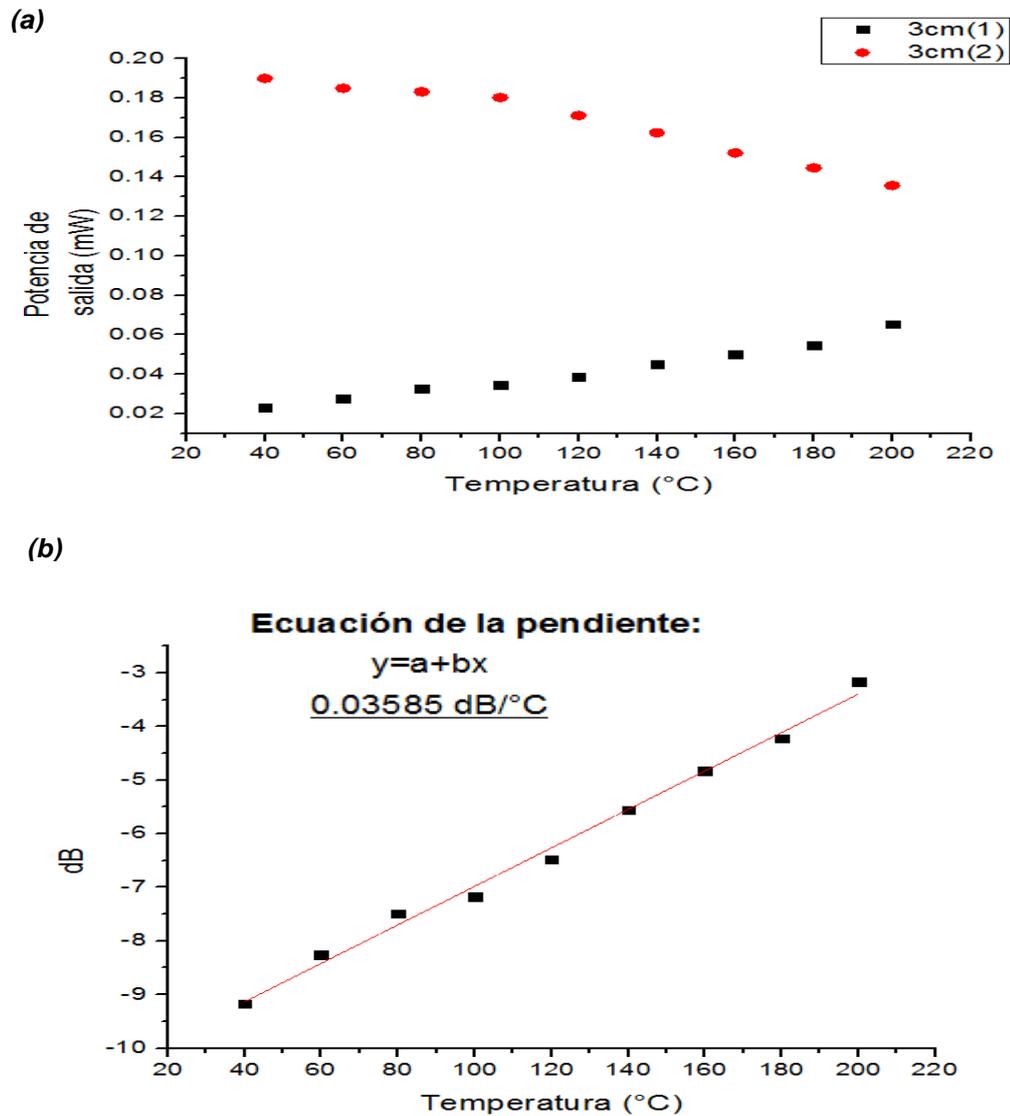


Fig. 5.2. (a) Mediciones de la potencia a los cambios de temperatura con dos sensores de 3 cm de longitud cada uno. (b) Pendiente del cociente de las dos señales de los sensores.

Se consideró la realización de dos nuevos sensores con longitudes de 5 cm cada uno, sabiendo que la fibra multinúcleo a mayor longitud los periodos de la señal se reducen en la longitud de onda y obteniendo en la parte lineal una pendiente con mayor inclinación logrando así un desplazamiento de su señal más significativo y por lo tanto obtener una mayor sensibilidad. Los resultados de las mediciones de las señales [Fig.5.3] son expresan en voltaje ya que fueron obtenidas mediante la señal de salida del fotodetector en DC.

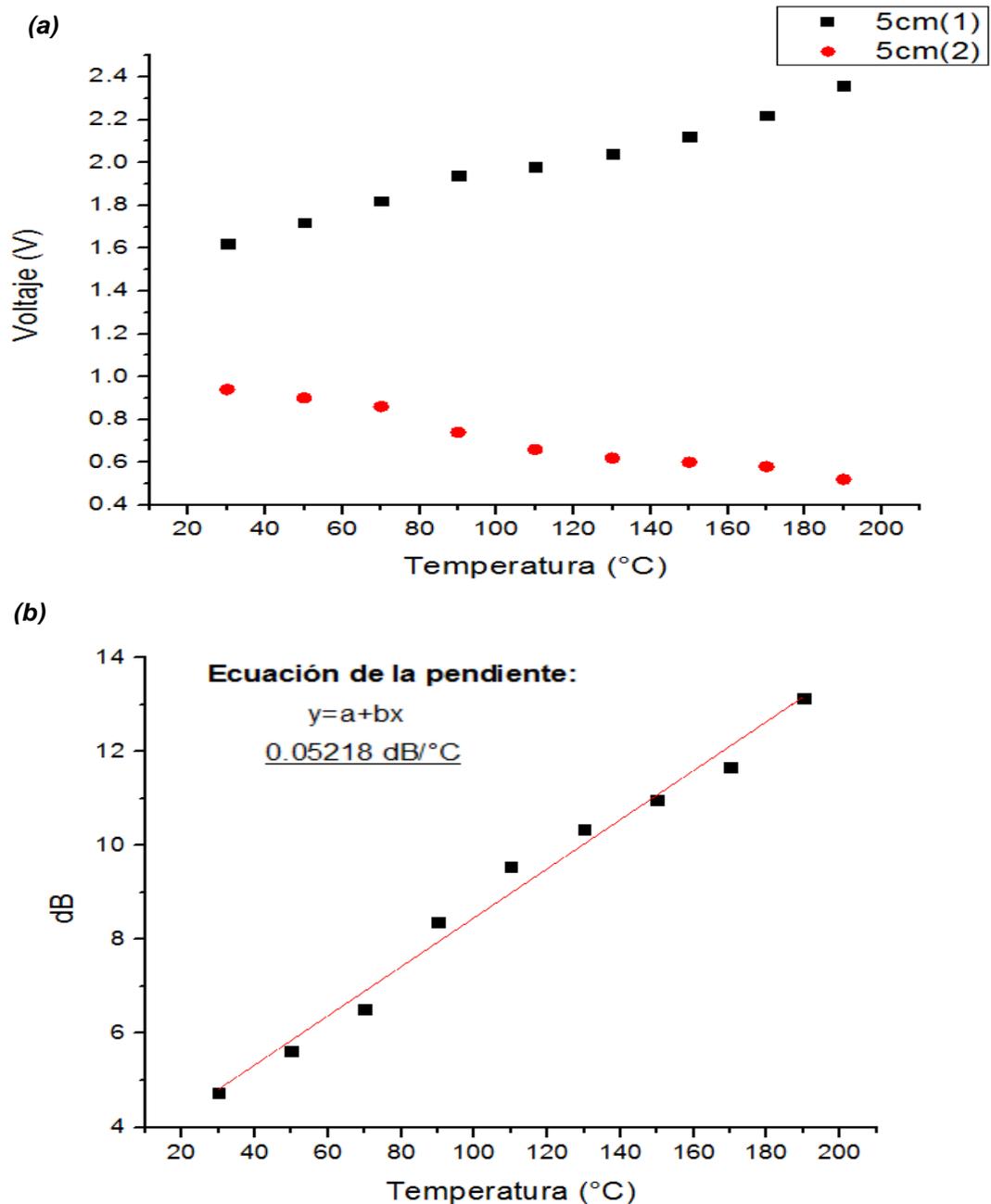


Fig. 5.3. (a) Mediciones de la potencia a los cambios de temperatura con dos sensores de 5 cm de longitud cada uno. (b) Pendiente del cociente de las dos señales de los sensores.

5.2. CONCLUSIÓN

El desarrollo del sensor de temperatura basado en fibra multinúcleo (3 núcleos) se logró realizar satisfactoriamente, obteniendo la respuesta deseada tras varias pruebas de mediciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos se aprecia claramente que los sensores desarrollados con la fibra multinúcleo a una longitud de 5 cm de fibra multinúcleo tuvieron una mayor sensibilidad al cambio de temperatura comparadas a longitudes menores.

La teoría y principios de funcionamiento de cada elemento óptico fueron claramente entendidos y comprobados en el transcurso del desarrollo del sensor de temperatura. La estructura del diseño del sensor de temperatura fue desarrollada basándose en la teoría ya existente además de referencias sobre investigaciones en torno al tema.

En cuanto a las mediciones realizadas se consideraron los métodos ratiométricos, quienes permitieron que los resultados fuesen más significativos, lo que se buscaba también es que no se obtuvieran un margen muy grande de error, ya que no permitiría obtener un buen resultado del comportamiento del sensor de temperatura.

La realización de este proyecto permite además generar a la empresa con la ayuda de una ingeniería especializada el desarrollo de un producto para el mercado jugando un papel importante en procesos industrial que requiera medir intervalos de 30 a 190°C. Además permite abrir nuevas investigaciones ya que se ha demostrado que el sensor es sensible a los cambios de temperatura, así bien se puede considerar el uso de la fibra multinúcleo para el sensado de otros parámetros.

5.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bahaa E. A, Saleh, Malvin Carl Teich. Fundamentals of Photonics (3rd Edition), J. W. Goodman.
- [2] Krohn, D.A. Fiber Optic Sensors, Fundamentals and Applications (3rd. Edition), ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society. 2000.
- [3] Shizhuo, Yin, and Ruffin, Paul B. Fiber Optic Sensors (2nd Edition), CRC Press.
- [4] A. Van Newkirk, E. Antonio-Lopez, G. Salceda-Delgado, M. Umar Piracha, R. Amezcua-Correa, and A. Schülzgen, “Multicore fiber sensors for simultaneous measurement of force and temperature” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 27, no. 27,2012.
- [5] L. Sójka, L. Pajewski, M. Sliwa, P. Mergo, T.M. Benson, S. Sujecki, and E. Berés-Pawlik, “Multicore microstructured optical fibre for sensing applications”, Optics Communications, vol. 344, pp. 71-76.
- [6] Qiang Wu, Yuliya Semenova, Pengfei Wang, Agus Muhamad Hatta and Gerald Farrell, “Experimental demonstration of a simple displacement sensor based on a bent single-mode-multimode-single-mode fiber structure” Measurement Science and Technology, vol. 22, pp. 5-7.
- [7] Valentín Guzmán Ramos, “Investigación y diseño de sensores de fibra óptica por interferometría” San Nicolás de los Garza, N.L. 2014.
- [8] Víctor H. Salas, Cesar Torres Moreno, “Sensor interferométrico basado en fibra óptica”, Revista Colombiana de Física, vol. 38,2006.
- [9] Pérez García, M. Ángel, Instrumentación electrónica (3ra. Edición), PARAINFO.
- [10] Ma. Cruz Navarrete Fernández, “Interferómetro de fibra óptica de tres brazos. Aplicación para el desarrollo de un sensor de presión”, Universidad Complutense de Madrid, 1994.

5.4. ANEXO

En el apartado se aprecian fotografías tomadas durante la realización del proyecto, se aprecian desde el manejo de la empalmadora, cortadora así como las conexiones de los equipos y dispositivos ópticos que se emplearon. Así mismo se aprecia el diseño que se utilizó para las mediciones a través de cada sensor fabricado.



Fig. 5.4. Utilización de la empalmadora con una fibra óptica.



Fig.5.5. Manejo de la cortadora con la fibra multinúcleo.

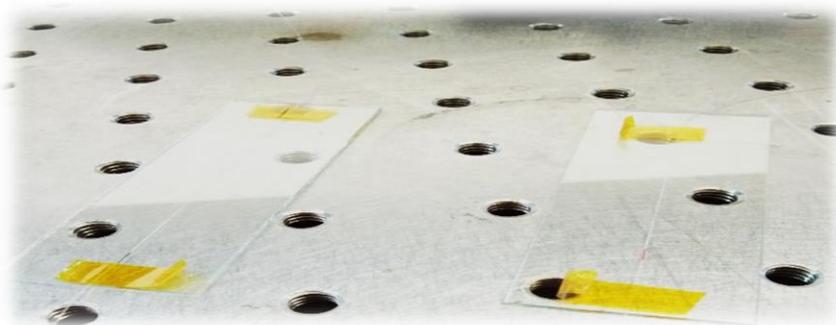


Fig.5.6. Sensores fabricados puestos en un porta objetos.



Fig.5.7. Conexión del diodo superluminiscente al analizador para tomar la señal de referencia



Fig. 5.8. Montaje de los polarizadores para la entrada de cada sensor.



Fig. 5.9. Prueba del láser sintonizable.



Fig. 5.10. Estructura para pruebas de los sensores.

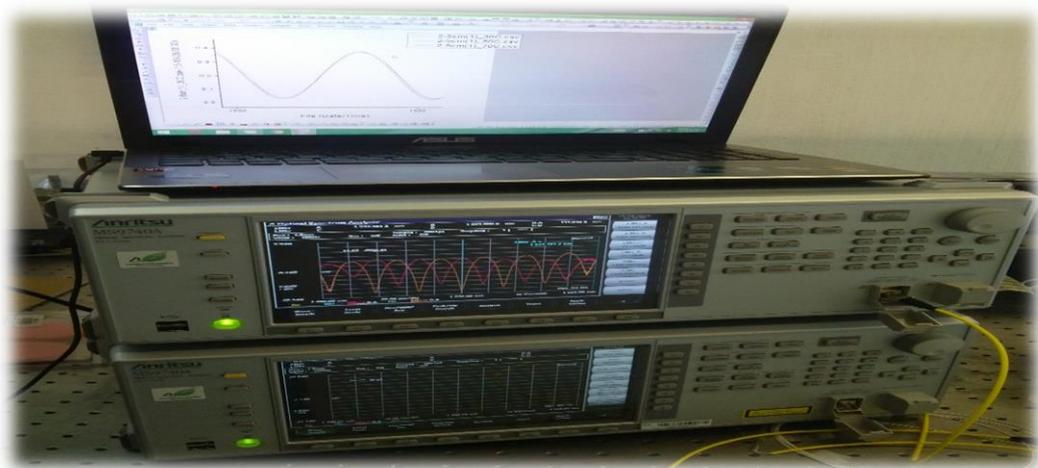


Fig. 5.11. Conexión de los dos sensores en el analizador para el desplazamiento de las señales a 180° una respecta a la otra.

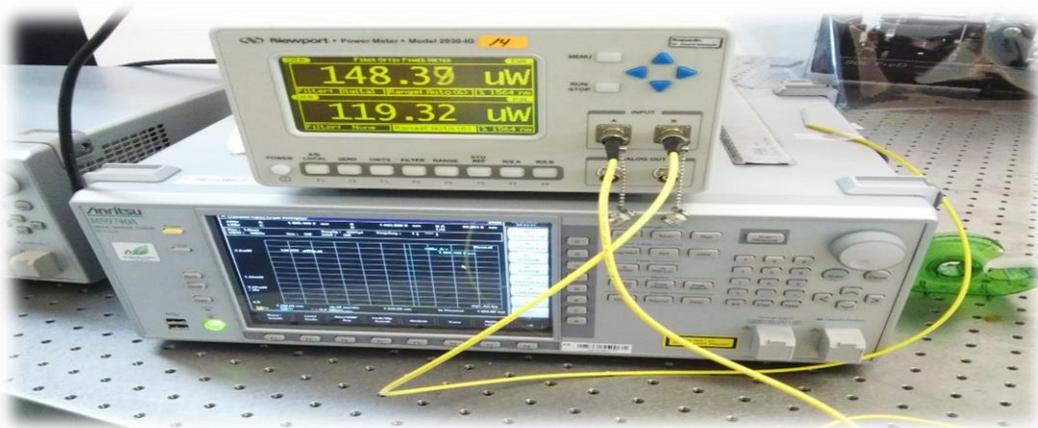


Fig. 5.12. Medición de los sensores al cambio de temperatura mediante un medidor de potencia.