



# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.

LABORATORIO DE FIBRAS ÓPTICAS

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

INFORME TECNICO. RESIDENCIA PROFESIONAL

PROYECTO:

PLATAFORMAS PARA MEDIR SIMULTÁNEAMENTE ÍNDICE  
DE REFRACCIÓN Y TEMPERATURA

PRESENTA:

ARREOLA CORZO LUIS FRANCISCO

ASESOR INTERNO:

ING. ÁLVARO HERNÁNDEZ SOL

ASESOR EXTERNO:

DR. DAVID MONZÓN HERNÁNDEZ

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS. DICIEMBRE DEL 2015

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1 .....	8
1.1 INTRODUCCIÓN .....	9
1.2 Justificación .....	10
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo general: .....	11
1.3.2 Objetivos específicos:.....	11
1.4 Caracterización del Área en que se participó .....	11
1.4.1 Antecedentes: .....	11
1.4.2 Misión y visión .....	12
1.4.3 Logros: .....	12
1.4.4 Organigrama general:.....	13
1.4.5 Área dónde se realizó el proyecto: .....	13
1.5 Problemas a resolver.....	15
1.5.1 Cronograma de actividades:.....	15
1.5.2 Descripción detallada de las actividades:.....	16
CAPITULO 2.....	17
2.1 Fundamento teórico.....	18
2.1.1 Reflexión total interna y campo evanescente de una onda incidente en una interface dieléctrica plana .....	20
2.1.2 Campo evanescente en una guía de onda de estructura cilíndrica.....	23
2.1.3 Procedimientos para extender el campo evanescente a la frontera fibra-medio externo .....	25
2.1.4 Técnicas seleccionadas .....	28
CAPITULO 3.....	34
3.1 Procedimiento.....	35
3.1.1 – Taper de fibra óptica monomodo.....	36
3.1.2 – Medición mediante 2 Tapers .....	39
3.1.3 – Rejillas de Bragg .....	40
3.1.4 – Fibra de cristal fotónico .....	43
CAPITULO 4.....	49

4.1 Resultados.....	50
4.1.1 – Taper de fibra óptica monomodo.....	50
4.1.2 – Rejillas de Bragg .....	51
4.1.3 – Fibra de cristal fotónico .....	55
4.2 Conclusiones y recomendaciones .....	61
4.3 Referencias bibliográficas.....	63
Anexos.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 1

Figura 1.1. Organigrama general del CIO	13
Figura 1.2 Laboratorio de fibras ópticas, CIO	14

### CAPITULO 2

Figura 2.1. Imagen de un refractómetro de Abbe comercial	18
Figura 2.2. Configuración del campo de una onda polarizada Perpendicularmente a la interface entre dos medios	20
Figura 2.3. Diagrama del núcleo de una fibra óptica	23
Figura 2.4. Estructura de una fibra óptica monomodo y la Distribución del campo eléctrico del modo fundamental en el núcleo	24
Figura 2.5. Representación de una fibra multimodo adelgazada Mediante ataque químico	25
Figura 2.6. Diagrama de la estructura de una fibra pulida en D	26
Figura 2.7. Representación de una fibra con estructura Hetero-núcleo formada por una sección de fibra monomodo Entre dos secciones de fibra multimodo	27
Figura 2.8. Esquema de una fibra óptica adelgazada Mediante el proceso de calentamiento y estirado	28
Figura 2.9. Esquema donde se describe el procedimiento de Adelgazamiento de la fibra óptica	29
Figura 2.10. Representación de una fibra adelgazada en Donde se identifica cada una de las zonas que la componen Y el régimen de propagación de la luz	30
Figura 2.11. Cálculo del valor del índice efectivo del modo	

Respecto al diámetro de la cintura de la fibra adelgazada En una fibra óptica monomodo standard	30
Figura 2.12. Distribución del campo eléctrico para dos Diferentes guías de onda	31
Figura 2.13. Imagen de la transición de una fibra adelgazada De manera no adiabática	31
Figura 2.14. Representación de una fibra óptica adelgazada No-adiabática	32
Figura 2.15. Representación del diagrama de un interferómetro Mach-Zehnder	32
Figura 2.16. Fotografía de la sección transversal de una fibra microestructurada	32
Figura 2.17. Diagrama del adelgazamiento de una fibra Microestructurada	33
<b>CAPITULO 3</b>	
Fig. 3.1 Máquina estrechadora de fibras ópticas	35
Fig. 3.2 Diagrama general de variables a considerar En una fibra Taper	37
Fig. 3.3 Valores de las variables de la primera fibra estrechada	38
Fig. 3.4 Señal resultante de la fibra óptica estrechada a 19.5 $\mu\text{m}$	38
Fig. 3.5 Diagrama general de variables a considerar en una Fibra con 2 Tapers consecutivos	39
Fig. 3.6 Señal resultante de la fibra estrechada con 2 Tapers consecutivos	40
Fig. 3.7. Representación esquemática de una rejilla de Bragg	41
Fig. 3.8 Señal resultante de una fibra con rejillas de Bragg	42
Fig. 3.9 Imagen vista a través de un microscopio que	

Muestra la forma en la que está fabricada una fibra de Cristal fotónico	43
Fig. 3.10 Señal resultante de una fibra óptica conectada a Una fuente de luz de 1550 nm	44
Fig. 3.11 Señal resultante de una fibra estrechada a 35 $\mu\text{m}$	44
Fig. 3.12 Señal resultante de una fibra estrechada Nuevamente a 35 $\mu\text{m}$	45
Fig. 3.13 Báscula y contenedor de PDMS	45
Fig. 3.14 Empalme de fibra monomodo con fibra de cristal fotónico	46
Fig. 3.15 Sistema utilizado para depositar la fibra en el PDMS	47
Fig. 3.16 Sistema descansando sobre una placa de metal Encima de la placa calentadora	47
Fig. 3.17 Taper depositado sobre el PDMS ya curado	48
Fig. 3.18 Señal obtenida del Taper una vez depositado Sobre el PDMS	48
 CAPITULO 4	
Figura 4.1 Gráfica resultante de prueba con etanol, acetona, Agua y alcohol Isopropilico	50
Figura 4.2 Gráfica resultante de pruebas de temperatura de Rejillas de Bragg (10°C-28°C)	51
Figura 4.3 Gráfica resultante de pruebas de temperatura de Rejillas de Bragg (30°C-48°C)	52
Figura 4.4 Gráfica característica de la prueba de temperatura Con rejillas de Bragg	53
Figura 4.5 Gráfica obtenida de las pruebas de índice de Refracción con rejillas de Bragg	54
Figura 4.6 Gráfica característica de pruebas de índice de Refracción con rejillas de Bragg	54

Figura 4.7 Gráfica resultante de pruebas de índice de Refracción con Fibra Taper de cristal fotónico	55
Figura 4.8 Gráfica resultante de pruebas de temperatura Con Fibra Taper de cristal fotónico	56
Figura 4.9 Gráfica característica de comportamiento a Temperatura de la fibra Taper de cristal fotónico	56
Figura 4.10 Gráfica característica de comportamiento a RI De la fibra Taper de cristal fotónico	57
Figura 4.11 Gráfica característica del margen de error en Pruebas de temperatura de la fibra Taper de cristal fotónico	58
Figura 4.12 Gráfica característica del margen de error en Pruebas de índice de refracción de la fibra Taper de Cristal fotónico	58
Figura 4.13 Gráfica resultante de prueba de temperatura De fibra Taper de cristal fotónico sumergido en agua	59
Figura 4.14 Gráfica característica de comportamiento A prueba de temperatura sumergida en agua de la fibra Taper de cristal fotónico	59
Figura 4.15 Margen de error considerado para las Pruebas de temperatura en cuanto a índice de refracción de la Fibra Taper de cristal fotónico sumergido en agua	60

# CAPITULO

# 1

## 1.1 INTRODUCCIÓN

De las áreas más importantes para la aplicación de sensores de fibra óptica actualmente es el monitorear variables químicas y biológicas de individuos o sistemas vivos. El índice de refracción de la muestra a tomar es una de las variables fundamentales a tomar en cuenta, debido a que muchas sustancias químicas y biológicas tienen un índice de refracción definido y conocido. De esta manera, su medición nos da indicios de posibles alteraciones en la muestra, que pueden ser dadas por contaminantes, ya sea por adulteración o enfermedad.

La temperatura es la variable externa que más afecta al índice de refracción de una muestra, por lo tanto, un control preciso de la temperatura es crucial al momento de monitorear índices de refracción de una muestra. Desafortunadamente esta condición es difícil de lograr en muchas ocasiones, sobre todo si tomamos en cuenta que uno de los propósitos que se quieren es llevar esta plataforma a la intemperie. Debido a esto, la temperatura es un parámetro que debe monitorearse simultáneamente con el índice de refracción, para que de esta forma determinar si las posibles variaciones del índice de refracción se dan por variaciones de temperatura o por algún factor diferente.

Por esto, este trabajo plantea presentar sistemas o plataformas que nos permitan medir de manera simultáneamente estos dos parámetros.

En este trabajo se presenta el método de interacción del campo evanescente de una fibra óptica, enfocándonos en la técnica de fibras adelgazadas por medio de calentamiento y estirado. De esta manera, logramos hacer interaccionar el campo evanescente de la luz guiada por la fibra óptica, compuesta por varios modos excitados, que se hace más grande mientras el Taper es más delgado.

## 1.2 Justificación

Bajo condiciones de medición controladas (temperatura), el índice de refracción que es un parámetro fundamental de la materia, una constante del medio que permite cuantificar e identificar las impurezas dentro de una sustancia o mezcla cuyos componentes químicos son conocidos. Todas las sustancias cuentan con un índice de refracción único y conocido, por eso el análisis de las variaciones del índice de refracción de estas sustancias permite determinar si esta cuenta con impurezas, y en caso afirmativo, su grado de contaminación.

Uno de los factores que más influye en la medición de índice de refracción es la temperatura. Las medidas comunes de índice de refracción deben realizarse en espacios controlados, de manera que, si se desea realizar estas mediciones en cualquier otro ambiente, la temperatura es un parámetro que se debe tomar en cuenta para obtener una medición correcta. Es de vital importancia saber la temperatura en el momento de medir cambios de índice de refracción, por esto que en este proyecto nos hemos propuesto desarrollar un dispositivo capaz de detectar tanto el índice de refracción de la sustancia medida como su temperatura.

Debido a que las fibras ópticas no se ven afectadas a temperaturas menores de 100°C, se recurrirá al uso de un elastómero, polidimetilsiloxano (PDMS). Este polímero es sensible a temperaturas bajas (el polímero en si resiste entre -45°C a 200°C, pero las pruebas serán en temperaturas de 10°C a 70°C, porque las medidas de índice de refracción se realizan en su mayoría a temperatura ambiente), y éste cambia sus propiedades mecánicas, químicas y ópticas, en particular el índice de refracción, a medida que la temperatura varía.

En la actualidad muchas de las técnicas usadas en metrología están siendo sustituidas por técnicas ópticas, por la alta sensibilidad que se puede alcanzar. En particular los sensores basados en estructuras de fibra óptica han recibido una atención significativa, esto es debido a las grandes ventajas que representan en comparación con los sensores mecánicos y electrónicos. Algunas de estas ventajas es su inmunidad ante interferencias de tipo electromagnético, no ser de un gran tamaño, y poder analizar las mediciones a largas distancias.

En el esquema presentado en este proyecto, se tiene la gran ventaja de solo usar una gota de la sustancia a medir (sustancias transparentes), unos cuantos micro litros, el suficiente para cubrir una sección de fibra óptica, y en consecuencia la cantidad de residuos generados es pequeña.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general:

Proponer, desarrollar y probar esquemas de fibra óptica para la medición simultánea de temperatura e índice de refracción.

### 1.3.2 Objetivos específicos:

- Conocer los principios de fibras ópticas.
- Conocer los fundamentos de los sensores.
- Conocer los fundamentos de los sensores de fibra óptica.
- Conocer los fundamentos de los sensores de fibra óptica para la medición de índice de refracción y temperatura.
- Conocer los fundamentos de los coeficientes termo-óptico y de expansión térmica de los materiales.
- Fabricar y medir las propiedades de dispositivos de fibra óptica con sensibilidad a cambios de índice de refracción.
- Integración de materiales con un coeficiente termo-óptico alto en un dispositivo de fibra óptica sensible a cambios de índice de refracción.
- Medición simultánea de índice de refracción y temperatura.

## 1.4 Caracterización del Área en que se participó

### 1.4.1 Antecedentes:

Acorde con el objetivo que el CONACYT estableció desde sus inicios, de fomentar una cultura competitiva basada en el desarrollo científico y tecnológico, enmarcando sus acciones en las políticas y objetivos del Plan Indicativo de Ciencia y Tecnología 1976-1982, el Consejo tuteló la fundación del Centro de Investigaciones en Óptica, Asociación Civil, (CIO), en la ciudad de León Gto. Dicho proceso de creación tuvo su inicio legal el 18 de Abril de 1980, en un acto protocolario en el que se levantó el acta constitutiva de la nueva institución, donde aparecen como firmantes quienes en la época eran autoridad en niveles de gobierno y dependencias oficiales: el Dr. Edmundo Flores, Director General del CONACYT, el Dr. Guillermo Soberón Acevedo, Rector de la UNAM, el Lic. Enrique Velasco Ibarra, Gobernador Constitucional del Estado de Guanajuato y el Lic. Harold Gabriel Appetl, Presidente del Ayuntamiento Constitucional de la Ciudad de León Gto.

La firma del acta constitutiva fue el corolario de múltiples afanes, retos, trabajo y logros previos que fueron encabezados por Dr. Daniel Malacara Hernández, primer científico mexicano en obtener un Doctorado en Óptica en la Universidad de Rochester en 1965, y actual Investigador Emérito del S.N.I.,

quien es referencia obligada en el desarrollo de la Óptica en todo el mundo. Es esa época y desde diversos encargos y puestos científicos y académicos tanto en la UNAM (en la Facultad de Ciencias primero y más adelante en el Instituto de Astronomía) y después en el INAOE (en donde colaboró en el proyecto para fundarlo a partir del antiguo Observatorio Astrofísico de Tonantzintla), trabajó convencido de la necesidad impostergable de crear en México una institución científica del más alto nivel dedicada en exclusiva al desarrollo de la Óptica, rama del conocimiento que tal como fue previsto por él mismo, es actualmente pieza fundamental y base estratégica de importantes y valiosos desarrollos en ciencia y tecnología.

#### **1.4.2 Misión y visión**

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.

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.

#### **1.4.3 Logros:**

Actualmente el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. se define como Centro Público de Investigación, con la misión de llevar a cabo investigación básica y aplicada en Óptica, la formación de recursos humanos de alto nivel en el mismo campo del conocimiento, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad, con la misión además de ser un Centro de Investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología en nuestro país.

#### 1.4.4 Organigrama general:

El organigrama actual del centro de investigaciones en óptica se encuentra en la Figura 1.1.

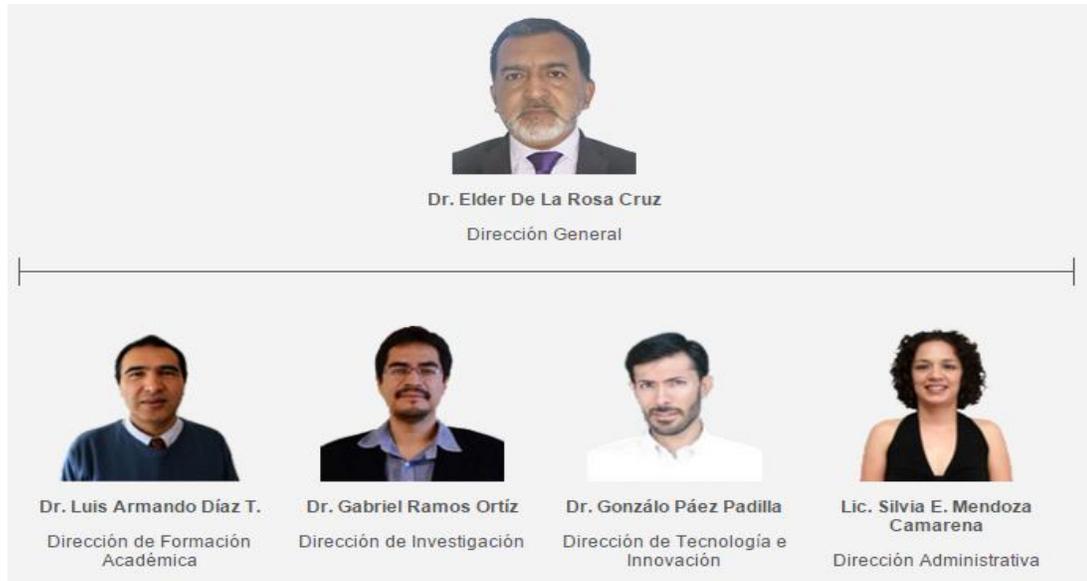


Fig. 1.1. Organigrama general del CIO

#### 1.4.5 Área dónde se realizó el proyecto:

**Fibras ópticas y láseres:** En el área de fibras ópticas y láseres se hace investigación básica de los procesos de generación, amplificación y propagación de la luz en una guía de onda cilíndrica (fibra óptica) con el objetivo de desarrollar tecnologías nuevas y eficientes, aplicadas fundamentalmente en el área de las comunicaciones, salud, generación de energía y metrología, por mencionar algunas.

Las líneas de investigación se concentran principalmente en el diseño y fabricación de fibras ópticas especiales tales como fibras ópticas micro estructuradas, propagación de la radiación en fibras estrechadas, generación de radiación láser pulsada y continua, emisión láser aprovechando la generación de efectos no lineales por la presencia de iones de elementos lantánidos como el Iterbio (Yb), Erbium (Er) o Tulio (Tm) en el núcleo de la fibra óptica, el desarrollo de sistemas de fibra óptica para medir variables físicas, químicas y/o biológicas del medio circundante.



Fig. 1.2 Laboratorio de fibras ópticas, CIO.

La mayoría de los artículos basados en los resultados teóricos y experimentales obtenidos en el Departamento se publican en las revistas internacionales más importantes en los campos de la física y particularmente en la óptica. El Departamento tiene colaboración con diversas universidades e institutos de investigación mexicanos y extranjeros, tales como la Universidad Nacional Autónoma de México (Ciudad de México), el Instituto de Ciencias Fotónicas (Barcelona), la Universidad de Valencia (Valencia), el "A.M. Prokhorov General Physics Institute" (Moscú), el "Imperial College" (Londres), y otros similares.

## 1.5 Problemas a resolver

### 1.5.1 Cronograma de actividades:

Actividad	Semana																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1. Revisión Bibliográfico	■	■															
2. Conocimiento de equipo de laboratorio	■	■	■														
3. Manipulación y preparación de fibras			■	■	■												
4. Fabricación de fibras adelgazadas				■	■	■											
5. Fabricación de interferómetros de fibra					■	■	■	■									
6. Estudio de la sensibilidad de dispositivos de fibra óptica a cambios de IR							■	■	■	■							
7. Integración de polímero con alto CTO alto								■	■	■	■	■					
8. Medición de IR y T simultáneamente										■	■	■	■	■			

9. Preparación de resultados																				
10. Conclusiones																				
11. Redacción de reporte																				

**1.5.2 Descripción detallada de las actividades:**

1. Es necesario que el estudiante antes de comenzar se tome 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 el estudiante tenga conocimiento del manejo del equipo de laboratorio, para esto se le proporcionará entrenamiento en cada uno de ellos pero también deberá revisar los manuales del equipo.
3. Es importante que si el estudiante no ha tenido contacto con fibras ópticas y tiene desconocimiento de los procedimientos de manipulación y preparación de las mismas para realizar mediciones, se tome tiempo para darle este conocimiento de manera que pueda realizar de manera adecuada el trabajo.
4. Una de las técnicas más explotadas en el laboratorio, por su alta sensibilidad, en la medición de cambios de índice de refracción es la interacción del campo evanescente en una fibra adelgazada. El estudiante entrará en contacto con esta técnica y fabricará diferentes tipos de dispositivos.
5. Una de las técnicas modernas de medición de índice de refracción es mediante los interferómetros de fibra óptica. El estudiante aprenderá los conceptos básicos y las técnicas más utilizadas en su fabricación. Se fabricarán algunos de los interferómetros de fibra óptica más comunes.
6. El estudiante probará la sensibilidad a cambios de índice de refracción de los diferentes dispositivos que fabrique.
7. Existen polímeros que tienen un alto coeficiente termo-óptico que pueden utilizarse como medios para medir la temperatura de un material que esté en contacto directo con ellos.
8. Estudiaremos la posibilidad de integrar estos materiales en un sistema de fibra óptica para medir cambios de índice de refracción con la idea de construir sistemas que nos permitan medir los dos parámetros de manera simultánea.
9. Durante toda la estancia el estudiante generará un documento en donde reporte todos sus avances
10. Así mismo se espera que el estudiante pueda elaborar un reporte de sus conclusiones en cada una de las etapas.
11. Se preparará un reporte general de actividades.

# CAPITULO

# 2

## 2.1 Fundamento teórico

El índice de refracción es un parámetro fundamental de la materia, que permite establecer el comportamiento de la luz al pasar a través de un material. El índice de refracción de un medio, es adimensional y comúnmente se identifica con la letra  $n$ , en la manera más simple se define como la razón entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio. En este trabajo, utilizamos solamente materiales dieléctricos por lo tanto  $n$  es una cantidad real. Durante mucho tiempo el índice de refracción solamente se ha utilizado en Óptica para identificar o clasificar los materiales, ya que es fundamental para estudiar las propiedades de la luz al pasar a través de ellos. Para medir el índice de refracción de una sustancia dieléctrica se utiliza un refractómetro, el más popular es el refractómetro de Abbe (Figura 2.1). Sin embargo, este aparato tiene limitaciones, la principal es que la medida es visual y por lo mismo tiene muchas fuentes de error. Así mismo es imposible realizar medidas en tiempo real o *in-situ*. Uno de los principales campos de aplicación de las técnicas refractométricas modernas está en la detección de gases o compuestos aromáticos emanados por algunas sustancias de interés. La investigación sobre estas técnicas se ha centrado principalmente en gases que presenten algún peligro, como por ejemplo  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2$  o sustancias contenidas en el TNT y que generan vapores característicos. Es obvio que para estas aplicaciones los sistemas de monitoreo deben ser de rápida respuesta, altamente sensibles ya que la diferencia del índice de refracción entre los diversos gases y el aire es de  $1 \times 10^{-4}$  o menor.

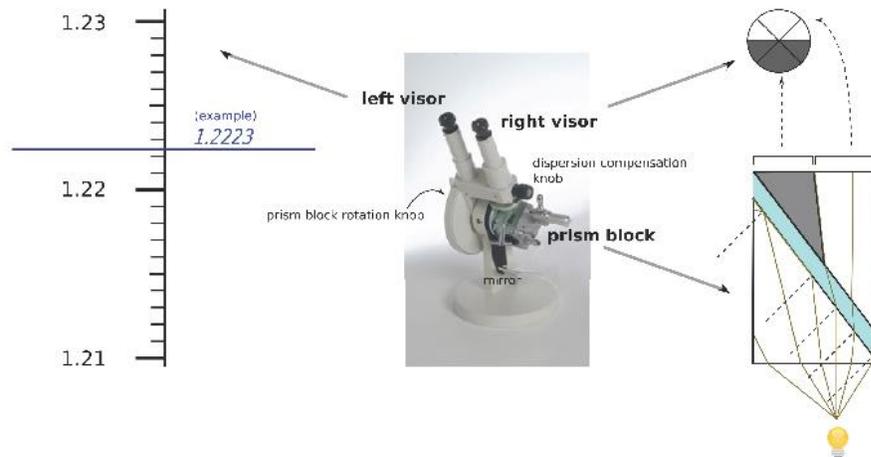


Figura 2.1. Imagen de un refractómetro de Abbe comercial (centro). En la imagen de la derecha se representa el diagrama óptico, dos prismas entre los cuales se coloca el material de prueba (en color azul) que produce una desviación de los haces. De acuerdo al índice de refracción los haces se desvían y producen una zona iluminada y otra oscura. La posición de la frontera entre la zona oscura y la zona iluminada, en una escala graduada (imagen de la izquierda) permite determinar el índice de refracción de la muestra.

En tiempos recientes el índice de refracción ha tomado mucha importancia porque se sabe que una sustancia al combinarse con otra cambia su índice de refracción. Este solo hecho tiene muchas aplicaciones, por ejemplo para medir la contaminación de sustancias. Pero también en el monitoreo de procesos de producción, de bebidas por ejemplo, ya que en cada etapa la sustancia tendrá un índice de refracción característico que se puede medir para asegurar que el proceso siga el curso adecuado. Toda mezcla de dos o más sustancias, ya sea que reaccionen o no, tiene un índice de refracción característico que en el caso que no reaccionen se puede calcular si se tienen los valores de los índice de refracción y el volumen de cada uno de las sustancias utilizadas. Pero la medición del índice de refracción de una sustancia producto de una mezcla requiere de técnicas ópticas bastante sofisticadas. Por otro lado en los últimos años los sensores biológicos, también conocidos como biosensores, acaparan la atención de la comunidad científica por sus implicaciones en áreas fundamentales como la medicina, la biología o la genética. Estos sensores se diseñan para identificar un determinado elementos biológico. En este campo las técnicas ópticas, entre ellas la refractometría, están jugando un papel muy importante ya se ha encontrado que presentan las sensibilidades mayores, son no invasivos, versátiles, simples de fabricar e interrogar. Esto ha abierto un enorme abanico de posibilidades para desarrollar refractómetros.

Cualquiera que sea la aplicación, las técnicas refractométricas modernas se están diseñando para realizar mediciones *in-situ*, en tiempo real, de manera automática, simple y barata. Pero principalmente el interés se ha centrado en el desarrollo de refractómetros, o técnicas refractométricas, que presenten una alta sensibilidad y resolución ya que los cambios de índice de refracción que se pretenden medir están en el rango de  $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-7}$ . Otro aspecto interesante a tomar en cuenta en los refractómetros, especialmente si estamos interesados en las aplicaciones arriba expuestas, es la temperatura. Existe una dependencia entre el índice de refracción de una sustancia y la temperatura, descrito a través del coeficiente termo-óptico (TOC). El TOC de un material establece los cambios en el índice de refracción de una sustancia con la temperatura. Este coeficiente puede ser tanto positivo como negativo, en dieléctricos sólidos como el vidrio es del orden de  $1 \times 10^{-6}$  RIU/°C. Mientras que en líquidos como el agua o el alcohol etílico, este valor es alrededor de  $1 \times 10^{-4}$  RIU/°C. En algunas aplicaciones, especialmente en aquellas en las que se realice mediciones de índice de refracción de sustancias cuya base es agua, el control de la temperatura durante la medición es crucial. Sin embargo, en algunas ocasiones es prácticamente imposible controlar la temperatura. En estas aplicaciones se requiere de esquemas que puedan medir simultáneamente tanto el índice de refracción como la temperatura.

En la actualidad existe un número importante de técnicas ópticas para medir el índice de refracción, o mejor dicho los cambios de índice de refracción, de una muestra bajo prueba. Pero debido a las ventajas que presentan las fibras ópticas respecto de otras técnicas, más precisas pero también más caras y sofisticadas, el desarrollo de refractómetros de fibra óptica se ha multiplicado en la última década. Los refractómetros de fibra óptica con más sensibilidad están basados en el fenómeno de interacción con el campo evanescente de una fibra óptica. Para entender los sensores de fibra óptica es necesario entender primero que es el campo evanescente. El mecanismo por el cual un rayo se confina dentro de una fibra óptica es la reflexión total interna y para poder visualizar adecuadamente este fenómeno en la frontera núcleo-revestimiento, es necesario un acercamiento al modelo teórico de una onda electromagnética en la interface. La forma más simple es considerar una interface dieléctrica plana.

### 2.1.1 Reflexión total interna y campo evanescente de una onda incidente en una interface dieléctrica plana

El entendimiento de la reflexión total interna de una onda incidente en la frontera de un dieléctrico proporciona importante conocimiento de la física del comportamiento de una guía de onda dieléctrica. Consideremos una onda plana perpendicularmente polarizada incidente en la frontera de un dieléctrico a un ángulo  $\theta_i$  respecto a la normal a la frontera, como se muestra en la Figura 2.2.

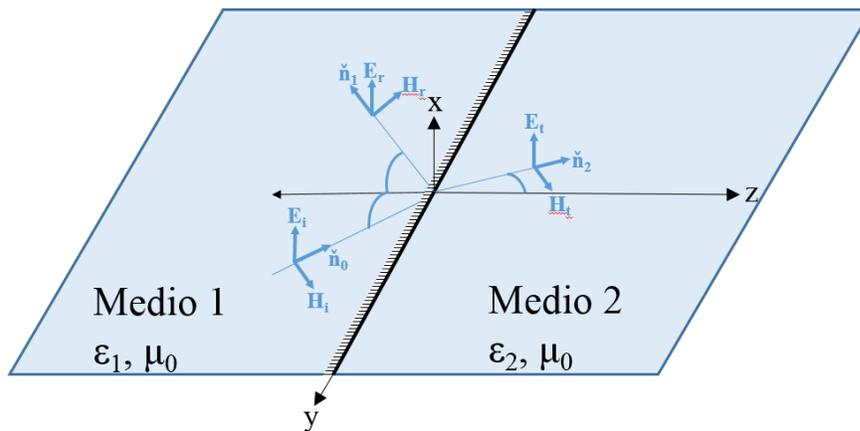


Figura 2.2. Configuración del campo de una onda polarizada perpendicularmente a la interface entre dos medios.

La permeabilidad magnética  $\mu_0$  es 1 para la mayoría de los materiales dieléctricos, mientras que  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  es la permitividad dieléctrica de cada uno de los medios involucrados. Cuando se trabaja en la región óptica del espectro de frecuencias y se usan materiales dieléctricos usualmente se expresa en

términos del índice de refracción en lugar de  $\epsilon$  ( $n = \sqrt{\epsilon}$ ). Usando la notación vectorial podemos definir el campo eléctrico incidente como

$$\bar{E}_I = \bar{E} e^{-j\bar{k}_0 \cdot \bar{r}}$$

Donde

$$\bar{E} = E_i \hat{a}_x$$

El objetivo es encontrar las expresiones para el campo reflejado y transmitido en términos de los parámetros conocidos  $E_i$ ,  $\theta_1$ ,  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ . Es posible escribir las expresiones generales para los campos transmitidos y reflejado como:

$$\bar{E}_R = \bar{E}_r e^{-j\bar{k}_1 \cdot \bar{r}} \hat{a}_x$$

$$\bar{E}_T = \bar{E}_t e^{-j\bar{k}_2 \cdot \bar{r}} \hat{a}_x$$

Donde los vectores de propagación y las unidades asociados con los campos incidente, reflejado y transmitido son:

$$\bar{k}_0 = k_1 \hat{n}_0, \quad \hat{n}_0 = \cos\theta_1 \hat{a}_z - \text{sen}\theta_1 \hat{a}_y, \quad k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_0}$$

$$\bar{k}_1 = k_1 \hat{n}_1, \quad \hat{n}_1 = -\cos\theta_1 \hat{a}_z - \text{sen}\theta_1 \hat{a}_y$$

$$\bar{k}_2 = k_2 \hat{n}_2, \quad \hat{n}_2 = \cos\theta_2 \hat{a}_z - \text{sen}\theta_2 \hat{a}_y, \quad k_2 = \omega \sqrt{\epsilon_2 \mu_0}$$

Sustituyendo estas últimas relaciones en las ecuaciones del campo eléctrico de las ondas incidente, reflejada y transmitida tenemos

$$\bar{E}_I = E_i e^{-jk_1(\cos\theta_1 z - \text{sen}\theta_1 y)} \hat{a}_x$$

$$\bar{E}_R = E_r e^{-jk_1(-\cos\theta_1 z - \text{sen}\theta_1 y)} \hat{a}_x$$

$$\bar{E}_T = E_t e^{-jk_2(\cos\theta_2 z - \text{sen}\theta_2 y)} \hat{a}_x$$

La reflexión total de la onda incidente ocurrirá cuando una onda incidente en la frontera desde un medio más denso de índice de refracción  $n_1$  a uno menos denso de índice de refracción  $n_2$ , a un cierto ángulo de incidencia igual o mayor que el ángulo conocido como ángulo crítico. La relación direccional entre la onda incidente y la onda transmitida está dada por la ley de Snell:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_0}}{\omega \sqrt{\epsilon_2 \mu_0}} = \frac{n_1}{n_2}$$

O

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_1$$

Para  $n_1 > n_2$  conforme aumenta  $\theta_1$  se aproxima al ángulo crítico  $\theta_c$  donde  $\theta_2 = \frac{1}{2}\pi$ , cuando ocurre esto:

$$\text{sen}\theta_2 = 1 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_c$$

Cuando  $\theta_2 = \frac{1}{2}\pi$  no hay onda propagándose en el medio 2 y por lo tanto la onda se propagará a lo largo de la interface entre el medio 1 y 2. Resolviendo la ecuación anterior se encuentra que el ángulo crítico es:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Para ángulos mayores de  $\theta_c$  ocurrirá la reflexión total interna. Si analizamos el comportamiento del campo de la onda transmitida, conforme  $\theta_1$  se aproxima a  $\theta_c$

$$\bar{E}_T = E_t e^{-jk_2(\cos\theta_2 z - \text{sen}\theta_2 y)} \hat{a}_x$$

Si

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_1 \quad \cos\theta_2 = \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \text{sen}^2\theta_1}$$

El campo eléctrico de la onda transmitida es ahora

$$\bar{E}_T = E_t e^{-jk_2 \left( -\frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_1 y + \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \text{sen}^2\theta_1} z \right)} \hat{a}_x$$

Conforme  $\theta_1$  aumenta de 0 a  $\theta_c$  tenemos una componente del vector de propagación de  $\bar{E}_T$  propagándose en dirección  $-y$  y una componente propagándose en dirección  $+z$ . Cuando  $\theta_1 = \theta_c$  tenemos

$$\text{sen}^2\theta_c = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

$$\sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \text{sen}^2\theta_1} = \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \left(\frac{n_2^2}{n_1^2}\right)} = 0$$

Entonces,

$$\bar{E}_T = E_t e^{jk_2 y} \hat{a}_x$$

El campo se propaga en dirección  $-y$  solamente, es decir a lo largo de la frontera. Ahora bien cuál es el comportamiento cuando  $\theta_1 > \theta_c$ ,

$$\text{sen}^2\theta_1 > \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad \text{y} \quad \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \text{sen}^2\theta_1} \text{ es imaginaria}$$

entonces,

$$\sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \text{sen}^2\theta_1} = -j \sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \text{sen}^2\theta_1 - 1}$$

El campo de la onda transmitida es entonces

$$\bar{E}_T = E_t e^{jk_z \left(\frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_1 y\right)} e^{-k_z \left(\sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \text{sen}^2\theta_1 - 1} z\right)} \hat{a}_x$$

De  $\bar{E}_T$  es una porción del campo eléctrico de una onda plana no uniforme que se propaga en dirección  $-y$ . Es importante notar que esta es una onda que se propaga en dirección  $-y$  pero que es atenuada o “EVANESCENTE” en la dirección  $+z$ . El coeficiente de  $z$  en la segunda exponencial es una constante de atenuación que determina la razón de decaimiento espacial del campo en el medio 2. La onda se propaga a lo largo de la superficie reflejantes pero no hay transporte de energía hacia el medio dos.

### 2.1.2 Campo evanescente en una guía de onda de estructura cilíndrica

Aun cuando en una guía de onda multimodal es costumbre simplificar el análisis si recurrimos a la óptica geométrica, el análisis más adecuado se fundamenta considerando la propagación de una onda electromagnética.

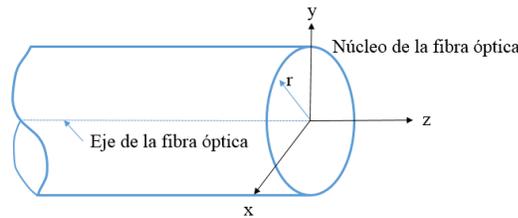


Figura 2.3. Diagrama del núcleo de una fibra óptica.

Para obtener los modos en una fibra óptica de índice escalón se debe resolver la ecuación de onda para el campo eléctrico y magnético en las regiones del núcleo y del revestimiento de la fibra óptica. A partir de las ecuaciones de Maxwell es posible obtener la ecuación de onda para el campo eléctrico y magnético en dirección  $z$ . Debido a la simetría cilíndrica de la fibra óptica, es común expresar la ecuación de onda en coordenadas cilíndricas.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 H_z = 0$$

Se puede encontrar que una de las soluciones de la ecuación para el campo eléctrico, cuando  $r < a$ , en donde  $a$  es el radio del núcleo de la fibra óptica, tiene la forma

$$E_z = AJ_v(\kappa r)e^{jv\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}$$

Dentro de esta región las soluciones aseguran que el campo de los modos guiados es finita en el centro del núcleo de la fibra óptica.

$$\text{si } r < a \quad E_z = BK_v(j\gamma r)e^{jv\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}$$

esta es la solución del campo eléctrico en el revestimiento como se sabe la función Bessel modificada  $K_v()$  decae exponencialmente respecto a  $r$ . Es decir que conforme nos alejamos de la frontera entre el núcleo y revestimiento el campo eléctrico decae exponencialmente o sea en esta región tenemos campo evanescente, como se observa en la Figura 2.4. En una fibra óptica el campo evanescente se extiende apenas unos cuantos micrómetros dentro del revestimiento, es decir en la frontera revestimiento-aire el campo eléctrico es nulo (Figura 2.4). Para lograr que el campo evanescente se extienda fuera de la fibra óptica y pueda ser afectado por eventos fuera de la fibra óptica, que es el objetivo de este trabajo, es necesario modificar la estructura de la fibra óptica.

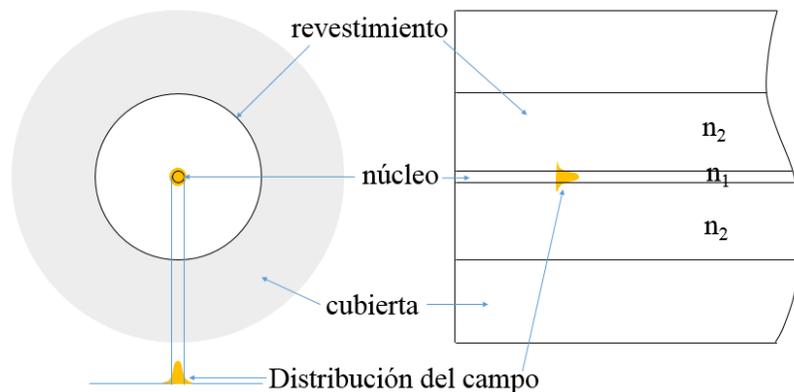


Figura 2.4. Estructura de una fibra óptica monomodo y la distribución del campo eléctrico del modo fundamental en el núcleo.

### 2.1.3 Procedimientos para extender el campo evanescente a la frontera fibra-medio externo

Las fibras ópticas fueron concebidas y fabricadas para transmitir señales a larga distancia de manera segura, para ello la información debe estar bien confinada en el núcleo de la fibra óptica. Este fue uno de los primeros problemas a los que se enfrentó la comunidad científica cuando se buscó diseñar nuevos esquemas de sensores químicos utilizando fibra óptica, ya que solamente se podían interaccionar con la luz guiada por una fibra óptica en el extremo de la fibra óptica. Esto limitaba mucho las posibilidades de los sensores de fibra óptica. Entonces lo que se requería era modificar la fibra óptica de tal manera que se pudiera interaccionar con la luz en cualquier punto de la fibra.

#### 2.1.3.1 Ataque químico de una fibra óptica

El primer intento fue reducir el diámetro del revestimiento, mediante un ataque químico selectivo utilizando ácido fluorhídrico diluido, hasta reducir la fibra óptica a un diámetro de solo unos pocos micrómetros mayor que el diámetro del núcleo, precisamente hasta que el campo evanescente del o los modos guiados por el núcleo pueda ser afectado por cambios en el medio externo. En la Figura 2.5 se muestra un diagrama de la fibra adelgazada por ataque químico. Este método es simple pero peligroso por las sustancias corrosivas utilizadas y debe ser realizado en una caja de guantes con un sistema de extracción de los gases emanados por el ácido. Se puede adelgazar cualquier tipo de fibra, monomodo o multimodo de vidrio. La repetitividad del proceso depende de un adecuado manejo de los tiempos en los que la fibra está sumergido en la solución. Los inconvenientes es que el acabado no es muy uniforme y la superficie de la fibra es rugoso, lo que puede afectar a la transmisión de la luz y la respuesta del sensor. Todas las fibras adelgazadas son frágiles y deben ser manejadas con ciertas precauciones.



Figura 2.5. Representación de una fibra multimodo adelgazada mediante ataque químico. El revestimiento es totalmente removido en una sección de la fibra óptica de tal manera que en esa región solamente se tiene el núcleo. El campo evanescente se extiende fuera de la fibra óptica por lo que la transmisión de la luz en esta fibra está fuertemente determinado por el medio externo.

### 2.1.3.2 Pulido lateral de una fibra óptica

A mediados de la década de los 90's un grupo de investigadores en Inglaterra propusieron un método de acceder al campo evanescente mediante el pulido lateral de una fibra óptica. El producto final es una fibra óptica en la que parte del revestimiento se remueve por medios mecánicos, obteniéndose una estructura similar a la mostrada en la Figura 2.6.

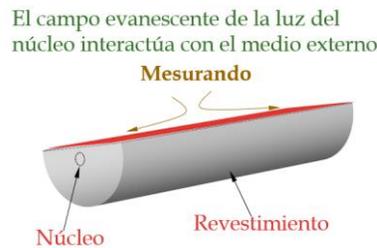


Figura 2.6. Diagrama de la estructura de una fibra pulida en D. Parte del revestimiento se remueve mecánicamente y el campo evanescente queda expuesto en una sección de la fibra óptica. Estos dispositivos son altamente dependientes de la polarización de la luz.

Como se puede observar en la zona de pulido, solamente quedan unos pocos micrómetros de revestimiento, el núcleo de la fibra óptica está muy cercano a la frontera revestimiento-medio externo. En esta sección el campo evanescente puede ser perturbado por el medio externo. Estos dispositivos son altamente sensibles a la polarización de la luz. En realidad el dispositivo final está montado en un bloque de vidrio igual al revestimiento, en el que se monta la fibra antes de comenzar el pulido. Esta técnica se aplica principalmente en fibras monomodo, es costosa porque requiere de herramientas y procedimientos altamente precisos.

### 2.1.3.3 Fibras ópticas hetero-núcleo

Una de las estructuras más simples de construir y mecánicamente resistentes es la conocida como hetero-núcleo. En la que como su nombre lo indica se inserta un trozo de fibra óptica entre dos fibras con diámetro de núcleo mayor. En el esquema mostrado en la Figura 2.7 se muestra una fibra con estructura hetero-núcleo formada por dos secciones iguales de fibra multimodo y entre ellas una sección de fibra monomodo de longitud  $L$ . En estas estructuras cuando la luz pasa de la fibra multimodo a la fibra monomodo parte de ella se propaga por el núcleo de la fibra monomodo, pero una parte se propaga por el revestimiento. Para esta parte de la luz, el revestimiento actúa como núcleo y el medio externo como revestimiento, por lo tanto tenemos campo evanescente en la frontera externa de la fibra con el cual se puede interactuar. Cuando la luz pasa de la fibra monomodo a la fibra multimodo, la luz del núcleo se acopla casi sin pérdidas en el núcleo de la monomodo. Parte de la luz que se propagó por el revestimiento de la fibra monomodo se acoplará al núcleo de la fibra multimodo y el resto se propagará por el

revestimiento y finalmente se absorberá por la cubierta de plástico. La perturbación debida a la interacción del campo evanescente, de la luz que se propagó por el revestimiento de la fibra monomodo, con el medio externo estará presente en la señal transmitida por la fibra óptica.

El campo evanescente de la luz del revestimiento de la fibra monomodo interactúa con el medio externo

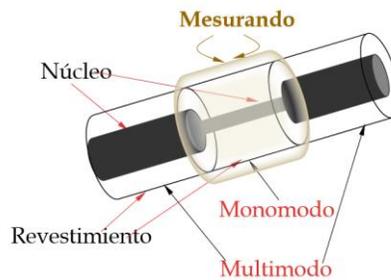


Figura 2.7. Representación de una fibra con estructura hetero-núcleo formada por una sección de fibra monomodo entre dos secciones de fibra multimodo. Parte de la luz en la sección monomodo se propagará en el revestimiento, por lo que se tiene campo evanescente en la frontera revestimiento-medio externo. Esta fibra es robusta y simple de fabricar.

#### **2.1.3.4 Fibra adelgazada por calentamiento y estirado**

Una de las técnicas, para acceder al campo evanescente, más frecuentemente utilizadas en los sensores químicos de fibra óptica por la alta sensibilidad que se puede lograr es el adelgazamiento por calentamiento y estirado. Es un método altamente repetitivo, con pocas pérdidas y produce dispositivos de mediana robustez. Se puede utilizar en cualquier tipo de fibra óptica, además es el que tiene más variantes, pues solamente se requiere una fuente de calor que pueda calentar la fibra hasta el punto de suavizado. En el mercado hay disponibles varias máquinas en las que la única variante es la fuente de calor, en la más simple se utiliza una flama producida por la combustión de oxígeno y butano o hidrógeno. En otra se utiliza un láser de CO<sub>2</sub> y en otras un elemento de grafito que se calienta cuando circula una corriente eléctrica a través. En la Figura 2.8 se muestra una representación de la estructura de una fibra adelgazada. Es importante notar que en una fibra adelgazada el núcleo y el revestimiento se adelgazan juntos y en la misma proporción. La luz en una fibra adelgazada tiende a extenderse, es decir conforme el diámetro de la fibra óptica va disminuyendo el campo evanescente aumenta, es posible que lograr que el campo evanescente se extienda fuera de la frontera de la fibra óptica si el diámetro de la fibra óptica decrece lo suficiente.

El campo evanescente en la zona adelgazada interactúa con el medio externo



Figura 2.8. Esquema de una fibra óptica adelgazada mediante el proceso de calentamiento y estirado. En la zona más delgada el campo evanescente interactúa fuertemente con el medio externo afectando las características de la luz transmitida.

### 2.1.4 Técnicas seleccionadas

En este trabajo se tiene como objetivo demostrar que es posible medir de manera simultánea el índice de refracción y la temperatura de una sustancia utilizando una fibra óptica. De entre las técnicas mencionadas anteriormente hemos elegido el procedimiento de adelgazamiento porque presenta importantes ventajas, la principal es la simplicidad en el proceso de fabricación. Además en la CIO se cuenta con dos máquinas para adelgazamiento de fibra óptica.

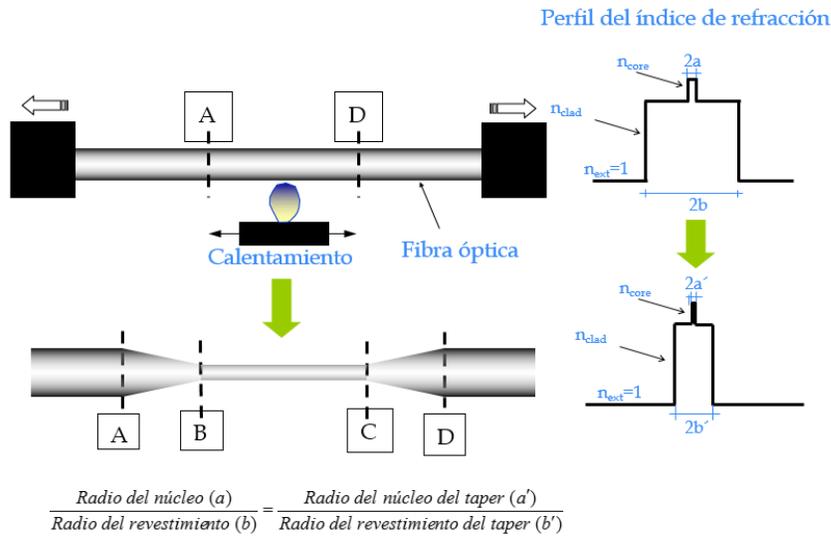
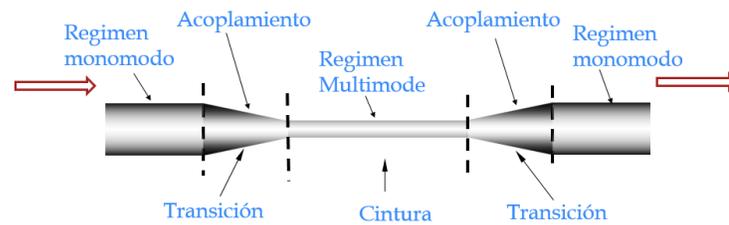


Figura 2.9. Esquema donde se describe el procedimiento de adelgazamiento de la fibra óptica y los cambios en las características de la fibra óptica antes y después del adelgazamiento.

En la sección adelgazada las dimensiones del núcleo y el revestimiento se reducen en la misma proporción, pero se debe mantener la razón entre los diámetros. Aunque debido a la elevada temperatura requerida para adelgazar la fibra óptica es probable que ocurra difusión y eso cambie los índices de refracción, sin embargo estos cambios no son significativos y se considera que solamente hay un escalamiento del perfil del índice de refracción de la fibra óptica. En la Figura 2.9 se muestra el escalamiento del perfil de índice de refracción de una fibra monomodo. En una fibra monomodo adelgazada tenemos dos

transiciones que conectan la zona no adelgazada con la cintura, de diámetro mínimo. En la transición de reducción, es decir, cuando el diámetro de la fibra decrece, ocurre una perturbación en las características de la guía que da lugar al fenómeno de acoplamiento modal. El modo fundamental, al propagarse por esta zona, excita otro u otros, modos que se pueden propagar en la transición. Cuando el diámetro de la fibra óptica es constante, en la cintura, el modo o los modos excitados se propagan hasta encontrar la segunda transición, donde el diámetro aumenta (Figura 2.10). En esta región los modos de la cintura se acoplarán al modo fundamental de la fibra monomodo. En un adelgazamiento adiabático, el modo fundamental de la fibra sin adelgazar se acopla a un solo modo de la cintura, este modo al pasar por la transición de aumento excita el modo fundamental de la fibra. Esta serie de transiciones, regularmente, no inducen pérdidas de potencia por lo que este tipo de dispositivos son muy apreciados. Aunque las características de la cintura de la fibra adelgazada permiten la propagación de varios modos, en el caso de una transición adiabática solamente se propaga un único modo, modo fundamental de la cintura.



Para calcular los modos en la cintura → Resolver la ecuación de onda

Figura 2.10. Representación de una fibra adelgazada en donde se identifica cada una de las zonas que la componen y el régimen de propagación de la luz.

Para calcular las características del modo de la cintura es necesario resolver la ecuación de onda con las condiciones a la frontera determinadas por las características de la cintura. El índice efectivo del modo conforme se reduce el diámetro de la fibra óptica se muestra en la Figura 2.11. En una fibra sin adelgazar, con un diámetro de 125  $\mu\text{m}$ , el índice efectivo del modo tiene un valor ligeramente menor que el del índice de refracción del núcleo, pero mayor del revestimiento. Se puede ver que este valor comienza a decrecer conforme el diámetro de la fibra óptica disminuye. Esto es un indicativo de que es un modo distinto al original. Para diámetros menores a los 10 micrómetros el índice efectivo disminuye de manera exponencial.

### Índice efectivo del modo fundamental a $\lambda=1550$ nm

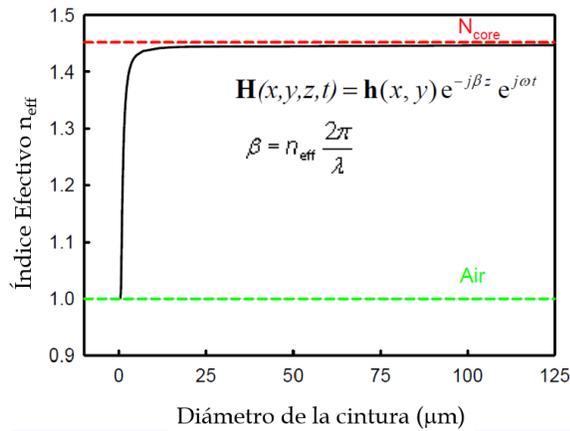


Figura 2.11. Cálculo del valor del índice efectivo del modo respecto al diámetro de la cintura de la fibra adelgazada en una fibra óptica monomodo standard, SMF 28 de Corning a una longitud de onda de 1550 nm.

Al disminuir el diámetro la distribución del campo cambia, en la Figura 2.12 se muestra la distribución del campo eléctrico del modo fundamental en una fibra óptica sin adelgazar y una fibra óptica adelgazada a 20  $\mu\text{m}$ . En el primer caso el campo está perfectamente confinado dentro del núcleo de la fibra óptica y solamente una pequeña porción del campo se propaga en forma de campo evanescente dentro del revestimiento. En una fibra óptica adelgazada a 20  $\mu\text{m}$ , el diámetro del núcleo es menor que el diámetro de la longitud de onda de la luz, por lo que la luz ya no se propaga por el núcleo sino por el revestimiento. Como se puede observar en la gráfica de la derecha la mayor parte de la energía está confinada al revestimiento. En la misma figura se muestra una representación del comportamiento del campo eléctrico de la luz guiada en las diferentes secciones de la fibra adelgazada.

### Distribución del campo a $\lambda=1550$ nm

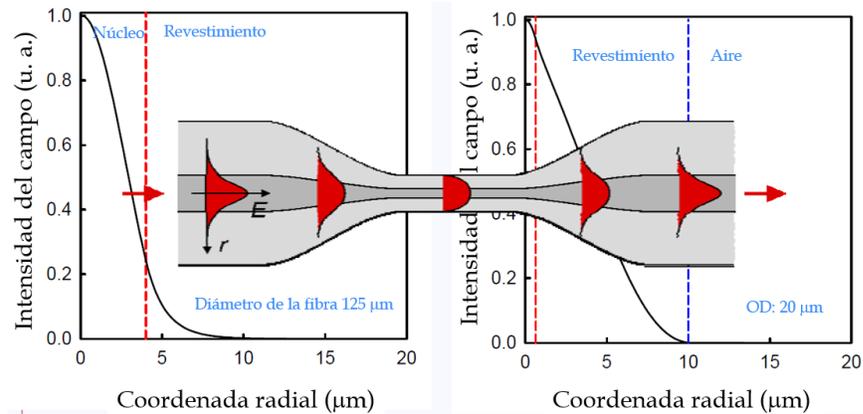


Figura 2.12. Distribución del campo eléctrico para dos diferentes guías de onda con dimensiones distintas.

Cuando la fibra óptica se adelgaza más allá de los 20 micrómetros, el campo evanescente se extiende fuera de la frontera de la fibra óptica, mientras menor sea el diámetro de la fibra óptica mayor será la intensidad del campo evanescente. Estas fibras son muy sensibles ante los cambios del medio ambiente.

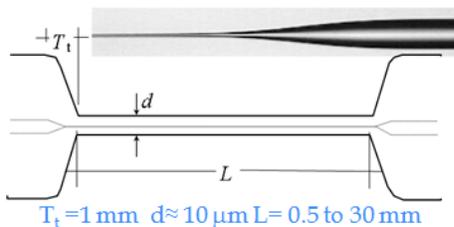


Figura 2.13. Imagen de la transición de una fibra adelgazada de manera no adiabática, obtenida con un microscopio, (superior). Representación de una transición no adiabática, con las dimensiones reales.

Cuando una fibra óptica se adelgaza de una manera no adiabática, como se muestra en la Figura 2.13, es decir cuando las transiciones son muy cortas de tal manera que el diámetro de la fibra óptica pasa de manera abrupta de un diámetro de 125  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  o menor, el modo fundamental se acopla a más de un modo. Cada uno de estos modos excitados viaja a lo largo de la cintura a diferente velocidad ya que cada uno tiene su índice efectivo, y en consecuencia una constante de propagación particular. Al llegar a la segunda transición los modos excitados se acoplan al núcleo de la fibra óptica en donde interfieren. Si en este tipo de fibras ópticas inyectamos la luz de una fuente de amplio espectro, como un led o un foco incandescente, observaremos a la salida una modulación de la señal transmitida. Esta modulación es producida

por la interferencia de los modos de la cintura. En la figura 2.14 se presenta un diagrama donde se representa este fenómeno.

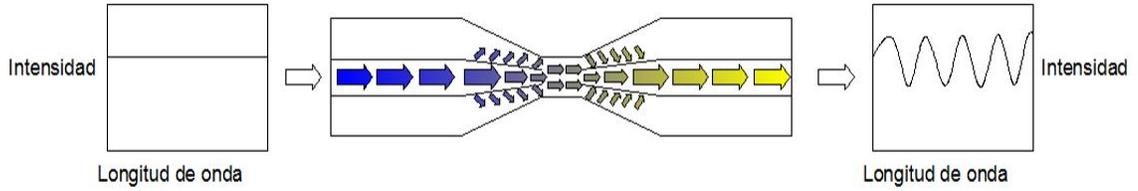


Figura 2.14. Representación de una fibra óptica adelgazada no-adiabática. Debido a las características de la transición el modo fundamental excita más de un modo que se propagan de manera simultánea por la cintura. En la segunda transición estos modos se acoplan al núcleo y dan lugar a la interferencia.

Se puede hacer analogía de un adelgazamiento no adiabático con un interferómetro Mach-Zehnder, como se muestra en la figura 2.15.

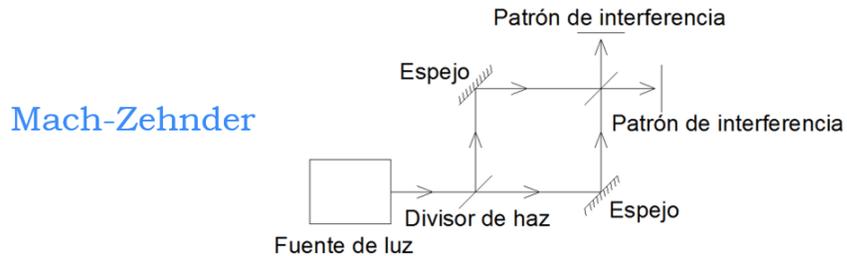


Figura 2.15. Representación del diagrama de un interferómetro Mach-Zehnder convencional.

Un esquema novedoso del IMZ se reportó por el Dr. Monzón Hernández y colaboradores del CIO, utilizando fibra microestructurada fabricada en el CIO. Esta fibra óptica no es completamente sólida, tiene canales de aire que corren paralelos al núcleo de la fibra óptica a lo largo de toda la fibra óptica. En la Figura 2.16 se muestra una fotografía de la sección transversal de una fibra microestructurada fabricada en el CIO.

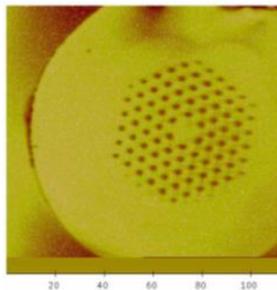


Figura 2.16. Fotografía de la sección transversal de una fibra microestructurada fabricada en el CIO. El diámetro exterior es de 125  $\mu\text{m}$ , el núcleo en el centro tiene un diámetro de 10  $\mu\text{m}$  y los agujeros de 3 micrómetros.

Cuando la fibra óptica microestructurada se adelgazó a un diámetro de 40 micrómetros aproximadamente los agujeros de aire se colapsaron y se generó una zona sin agujeros, sólida, multimodal. Este colapso tiene un comportamiento similar al de un adelgazamiento no-adiabático por lo que tenemos más de dos modos propagándose. En la figura 2.17 se muestra una representación de la fibra microestructurada adelgazada y en la parte superior dos imágenes obtenidas con un microscopio, en donde se muestra la sección transversal de la fibra sin adelgazar y en la región adelgazada la zona donde ocurre la transición entre el colapso de los agujeros y la región con agujeros.

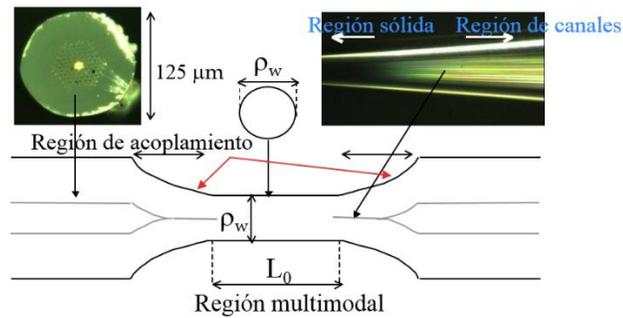


Figura 2.17. Diagrama del adelgazamiento de una fibra microestructurada, en donde se muestra una imagen del colapso de los agujeros.

La transmisión de la luz a través de esta fibra óptica microestructurada adelgazada se puede aproximar a la de interferencia del modo fundamental y modos de orden superior.

$$I = I_{core-mode} + \sum_j I_{high-ordermode}^j + \sum_j 2\sqrt{I_{core-mode} I_{high-ordermode}^j} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (n_{eff}^{core-mode}(n_{ext}) - n_{eff}^{high-ordermode,j}(n_{ext}))L\right]$$

El tercer término de esta ecuación es el término de interferencia, el argumento de la función coseno que determina las características de la interferencia depende del índice de refracción del medio exterior a la fibra óptica. Es decir que si se modifica este parámetro, se cambiará el patrón de interferencia.

# CAPITULO

# 3

### 3.1 Procedimiento

Los dispositivos de fibra óptica más explorados para desarrollar sensores de índice de refracción son los *tapers*. En este trabajo nos hemos centrado casi exclusivamente este tipo de dispositivos de fibra óptica. Principalmente hemos trabajado con fibras adelgazadas de manera no adiabática para generar interferómetros modales. Es decir, las técnicas presentadas a continuación se basan en el fenómeno de interferencia. Aprovechando la propiedad que pueden dárseles a las fibras ópticas como interferómetros se pueden inducir cambios en los modos que interfieren entre sí mediante la interacción con el campo evanescente dependiendo de la sustancia que esté en contacto con el *Taper*.

Para desarrollar un método para medir simultáneamente la temperatura e índice de refracción de una sustancia fabricamos y probamos tres diferentes dispositivos de fibra óptica, de los cuales a continuación se muestran tanto el procedimiento de fabricación como las pruebas realizadas. Nos enfrentamos a diferentes retos en cada uno de ellos, pero solamente uno de los dispositivos probados demostró tener la respuesta esperada. Es por eso que aunque se hace mención de las tres, solamente abundaremos en los resultados con el dispositivo que mejor funcionó. Todos los *Tapers* utilizados a través de todas las técnicas probadas se realizaron con la máquina estrechadora ubicada en el laboratorio de fibras ópticas. La figura 3.1 muestra la imagen de dicha máquina estrechadora.

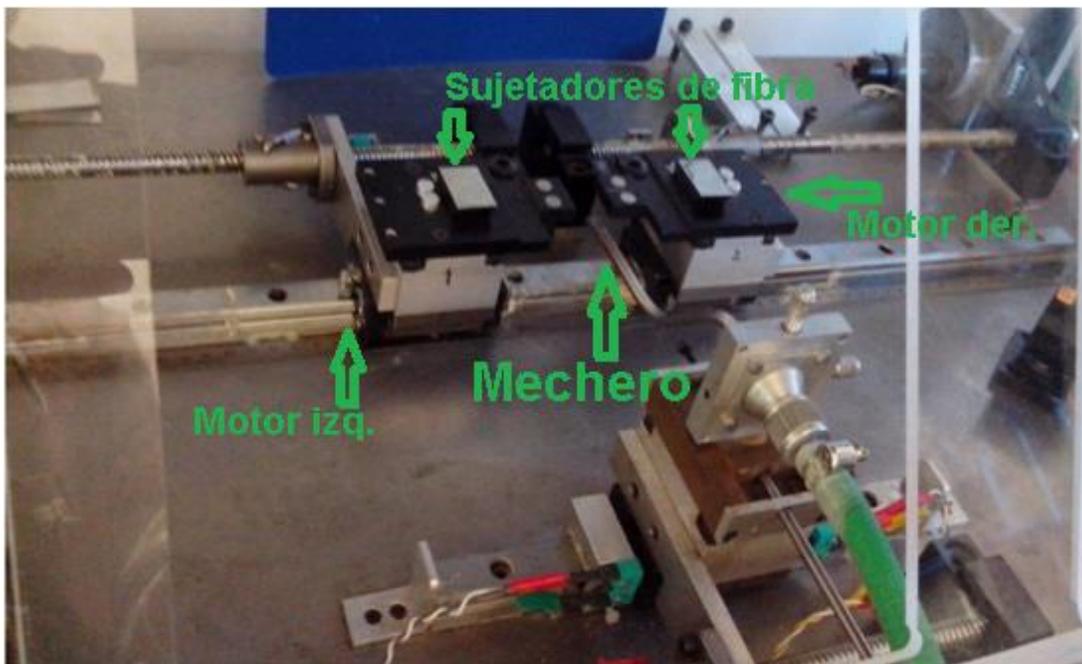


Fig. 3.1 Máquina estrechadora de fibras ópticas

El procedimiento de adelgazamiento de la fibra óptica se puede describir de una manera resumida de la siguiente manera. Primeramente debemos remover el polímero que cubre y protege la fibra óptica de la sección que vamos a calentar. Este procedimiento lo podemos hacer mecánicamente, con unas pinzas comerciales especialmente diseñadas para este propósito o sumergiendo la sección deseada de la fibra óptica en acetona durante 5 a 10 minutos o en cloruro de metileno durante máximo 1 minuto. El polímero se desprende del vidrio fácilmente. La sección desnuda de la fibra óptica se limpia perfectamente para remover cualquier impureza que haya quedado y que pueda afectar el procedimiento de adelgazamiento. La limpieza se hace con un pañuelo especial, que no deja residuos, impregnado de acetona. Enseguida colocamos esta sección desnuda de la fibra óptica entre las dos monturas de desplazamiento y se inmoviliza la fibra óptica con los sujetadores. El microsoplete o mechero, que también está sujeto sobre una montura de desplazamiento, que tiene unos orificios pequeños en la punta por el que salen los gases (oxígeno y butano) que generan la flama. Se enciende la flama y el soplete se mueve para que la flama quede directamente bajo la sección de fibra desnuda. Al mismo tiempo que se coloca la flama se acciona un interruptor que activa los motores de que sujetan la fibra óptica. Los motores se mueven en direcciones contrarias para estirar la fibra óptica mientras se calienta. La flama debe de estar a una temperatura que permita suavizar el vidrio. La montura que sostiene el soplete puede desplazarse a lo largo de la fibra óptica en un movimiento de vaiven o permanecer estática dependiendo de las características deseadas en el taper. Una vez que se ha logrado reducir la fibra óptica al diámetro deseado, se detiene el proceso y se retira la flama. Entonces la fibra adelgazada se puede retirar de la máquina.

Antes de comenzar el procedimiento de adelgazamiento debemos calcular la distancia que las monturas que sujetan la fibra óptica se han de desplazar para lograr el diámetro deseado de la cintura del *taper*. Para esto recurrimos a la siguiente relación:

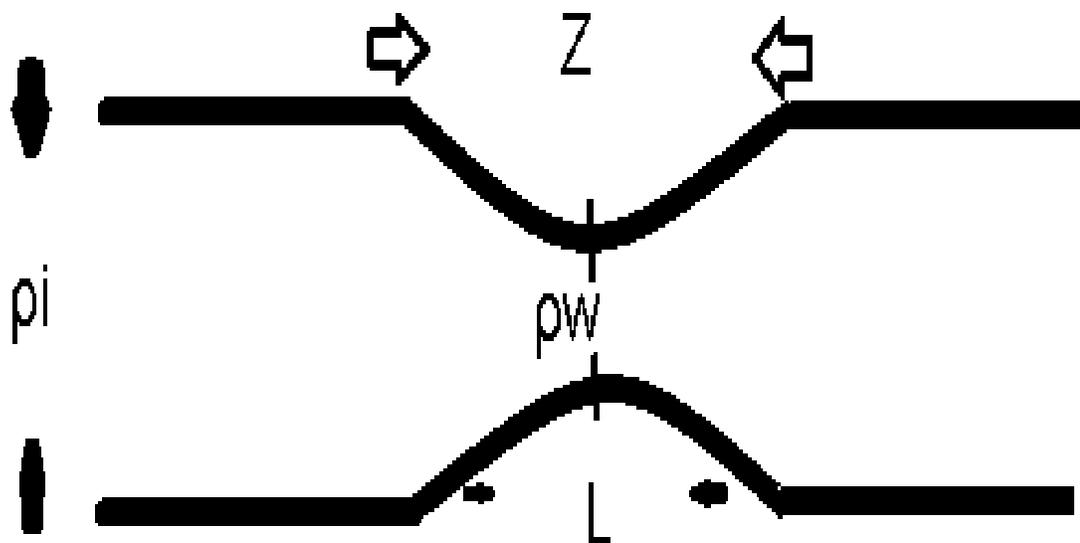
$$\rho_w = \rho_i e^{\left(-\frac{z}{2L}\right)}$$

En donde  $r_w$  y  $r_i$  son el diámetro final inicial de la fibra óptica,  $z$  es el desplazamiento total de las monturas y  $L$  es la longitud de la fibra óptica bajo calentamiento. En el *taper* dibujado en la Fig. 3.2 se muestra cada uno de estos parámetros.

### 3.1.1 – Taper de fibra óptica monomodo

Una de las técnicas más simples de lograr un interferómetro de fibra óptica es mediante el adelgazamiento no adiabático o Taper no adiabático. Aprovechando la experiencia de proyectos anteriores en el laboratorio de fibras ópticas, en este partimos de las especificaciones de los tapers fabricados y que se reportan en el artículo de la referencia 10. Después se analizaron los cambios en la luz reflejada o transmitida por estos dispositivos antes los cambios de índice de refracción.

En la máquina estrechadora, se tiene la modalidad de flama oscilante y flama estática, en los primeros *tapers* que fabricamos con fibra monomodo estándar, se fabricaron con flama estática en este caso  $L = 2$  mm.

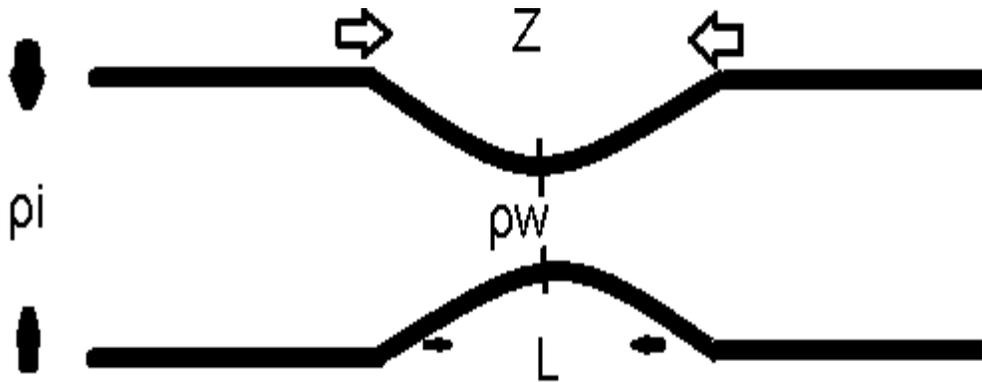


$\rho_i$  = Diámetro original     $\rho_w$  = Diámetro fibra adelgazada  
 $Z$  = Desp. total de motores     $L$  = Longitud de calentamiento

Fig. 3.2 Diagrama general de variables a considerar en una fibra Taper

La primera fibra en probarse, se calculó para quedar adelgazada a  $19.5\mu\text{m}$  en  $1$  cm de fibra, que previamente había sido adelgazada a  $25\mu\text{m}$  con mecha estática, ya que a ese diámetro exacto obtenemos cuatro picos en la señal en reflexión, que son suficientes para analizar cambios de índice y basarnos en un pico durante todas las sustancias a medir.

La figura 3.3 muestra los valores de las variables de la fibra Taper y la figura 3.4 muestra la señal obtenida de dicho Taper:



$\rho_i = 25 \text{ } \mu\text{m}$   
 $Z = 3 \text{ mm}$

$\rho_w = 19.5 \text{ } \mu\text{m}$   
 $L = 6 \text{ mm}$

Fig. 3.3 Valores de las variables de la primera fibra estrechada

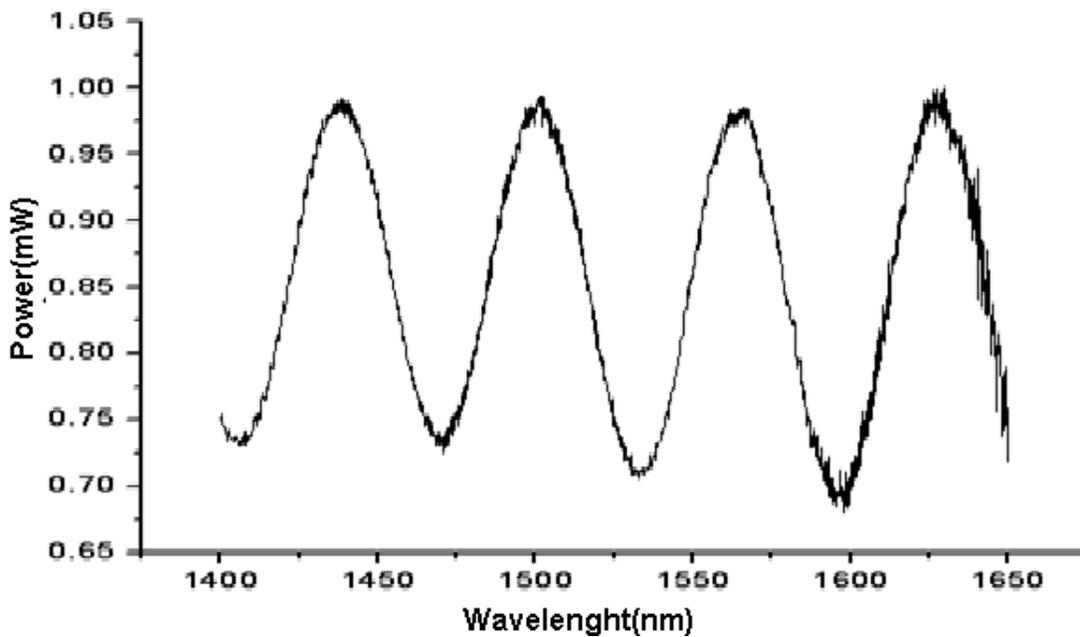
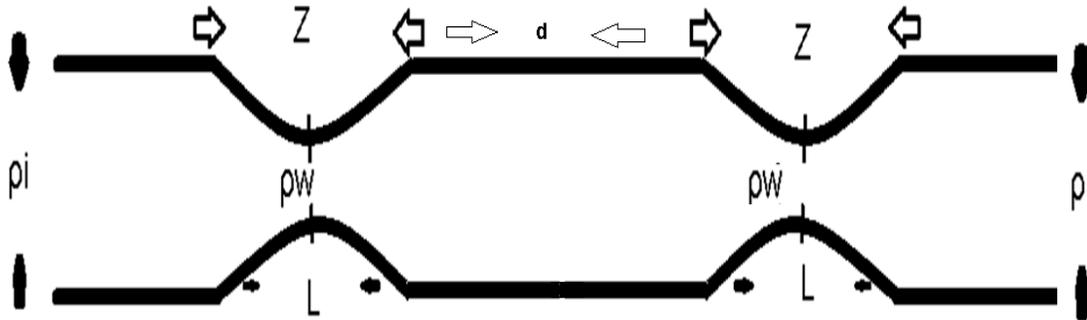


Fig. 3.4 Señal resultante de la fibra óptica estrechada a 19.5  $\mu\text{m}$

Esta fibra fue la que se llegó a probar para cambios de índice de refracción, debido a que las fibras de 11.57  $\mu\text{m}$ , 7.72  $\mu\text{m}$  y 3.94  $\mu\text{m}$  (Anexo 1, 2 y 3) daban una señal cuyo periodo era muy grande y no se podía tomar un punto de referencia para las mediciones.

### 3.1.2 – 2 Medición mediante 2 Tapers

Una de las técnicas que se llegaron a aplicar fue el de tener 2 Tapers separados uno de otro a una distancia determinada, siendo probadas a 1cm, 1.5cm y 2cm, con un diámetro de 20um. La fig. 3.5 muestra de manera general las variables consideradas para este esquema:



$\rho_i$ = Diámetro original    $\rho_w$ = Diámetro fibra adelgazada    $d$ =dist. entre Tapers  
 $Z$ = Desp. total de motores    $L$ = Longitud de calentamiento

Fig. 3.5 Diagrama general de variables a considerar en una fibra con 2 Tapers consecutivos

El objetivo de esta técnica es lograr que uno de los Tapers se encargue de medir los cambios en índice de refracción, mientras que el otro Taper se encargue del sensado de la temperatura.

Esta técnica fue desechada totalmente al ver la señal de respuesta de la fibra, puesto que ninguna parte de la señal podía ser tomada como referencia para seguirla en cuanto se hicieran las pruebas a cambios de índice de refracción.

La respuesta arrojada por una fibra Taper usando esta técnica se muestra en la figura 3.6:

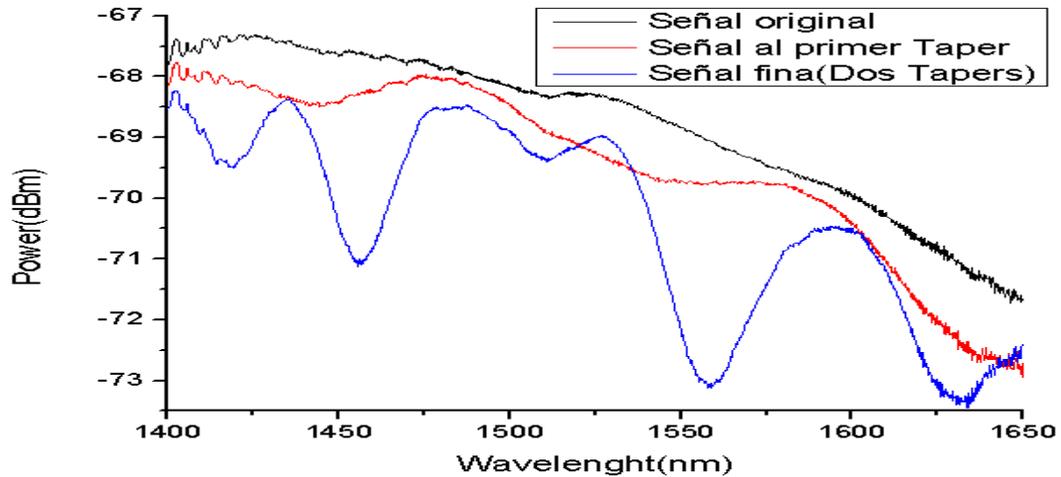


Fig. 3.6 Señal resultante de la fibra estrechada con 2 Tapers consecutivos

Las señales tomadas de los otros dos Tapers bajo esta técnica arrojan resultados similares, aun cambiando la distancia de separación (1.5 cm y 2cm respectivamente), con un diámetro de 20  $\mu\text{m}$ . (Anexo 4).

### 3.1.3 – Rejillas de Bragg

En todos los campos de la ciencia y la tecnología hay desarrollos que son revolucionarios, en el campo de las fibras ópticas, las rejillas de Bragg representan un parte aguas, un antes y un después. Estos dispositivos desarrollados a entre las décadas de 1980 y 1990, revolucionaron los tres campos fundamentales de las fibras ópticas, las comunicaciones, los láseres y los sensores. Una rejilla de Bragg de fibra en términos sencillos puede ser descrita como una modulación periódica del índice de refracción del núcleo. La luz guiada a través del núcleo de una fibra óptica, es esparcida por cada uno de los planos de la rejilla. Si no cumple con la condición de Bragg, la luz reflejada por cada plano estará fuera de fase y se cancelará. La luz que no coincida con la longitud de onda de resonancia  $\lambda_B$  experimentará una reflexión débil en cada plano. La condición de Bragg es simplemente el requerimiento de que se cumpla tanto la conservación de la energía como del momento.

El funcionamiento de este dispositivo puede ser descrito como un filtro rechaza banda, ya que una banda de las longitudes de onda que pasen a través de la rejilla será reflejada. En la Figura 3.7 se observa una representación de este comportamiento. Cuando pasa a través de una rejilla de Bragg una señal óptica compuesta por varias longitudes de onda, es decir una señal de una fuente de amplio espectro, parte de esta señal será reflejada y el resto se

transmitirá con pérdidas mínimas. Si analizamos ambos espectros, observaremos en la señal transmitida que a una longitud de onda la señal prácticamente ha desaparecido. Esta longitud de onda ha sido reflejada y la observaremos en el espectro de la señal reflejada.

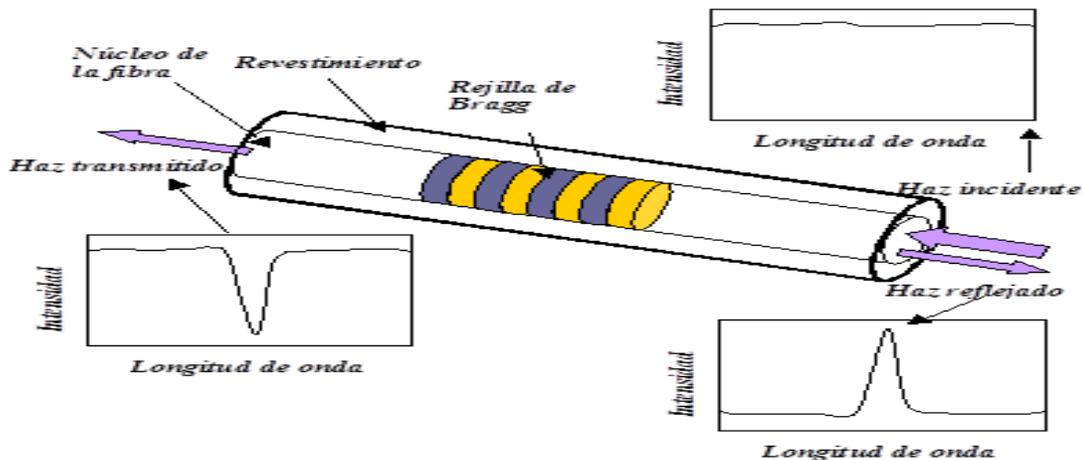


Fig. 3.7. Representación esquemática de una rejilla de Bragg. Una de las cualidades más interesantes de este dispositivo es el ancho espectral de la señal reflejada (de unos cuantos nm hasta .1nm)

La rejilla de Bragg se forma cuando el núcleo de la fibra se expone a un patrón de interferencia de luz ultravioleta. Este dispositivo es altamente sensible a cambios de temperatura ya que tanto el índice efectivo del modo acoplado como el periodo de la rejilla dependen fuertemente de la temperatura del medio ambiente. Sin embargo este dispositivo no es sensible a cambios de índice de refracción. Ya que nosotros estamos interesados en mediciones de índice de refracción la idea era construir un dispositivo que tenga sensibilidad a este parámetro y combinarlo con una rejilla de Bragg. Para el primero decidimos trabajar con una estructura hetero-núcleo que como ya se describió en la sección anterior puede sensar los cambios de índice de refracción. Para construirla, una fibra multimodo se empalma con 1cm de fibra monomodo estándar, y el otro extremo de la monomodo se empalmarse a otro trozo de fibra multimodo de las mismas características. Es en la pequeña sección de fibra monomodo donde se grabarán las rejillas de Bragg. Con éste método se plantea que el sensado de índice de refracción se haga por la formación del campo evanescente formado por los empalmes multimodo-monomodo-multimodo. Mientras que el sensado de temperatura sea gracias a las rejillas de Bragg, puesto que por sí solas las rejillas de Bragg ya son sensibles a cambios de temperatura.

La señal resultante de una rejilla de Bragg grabada en una fibra óptica monomodo en las instalaciones del CIO, analizándola en transmisión con una fuente de luz LED de 1550nm, fue la siguiente:

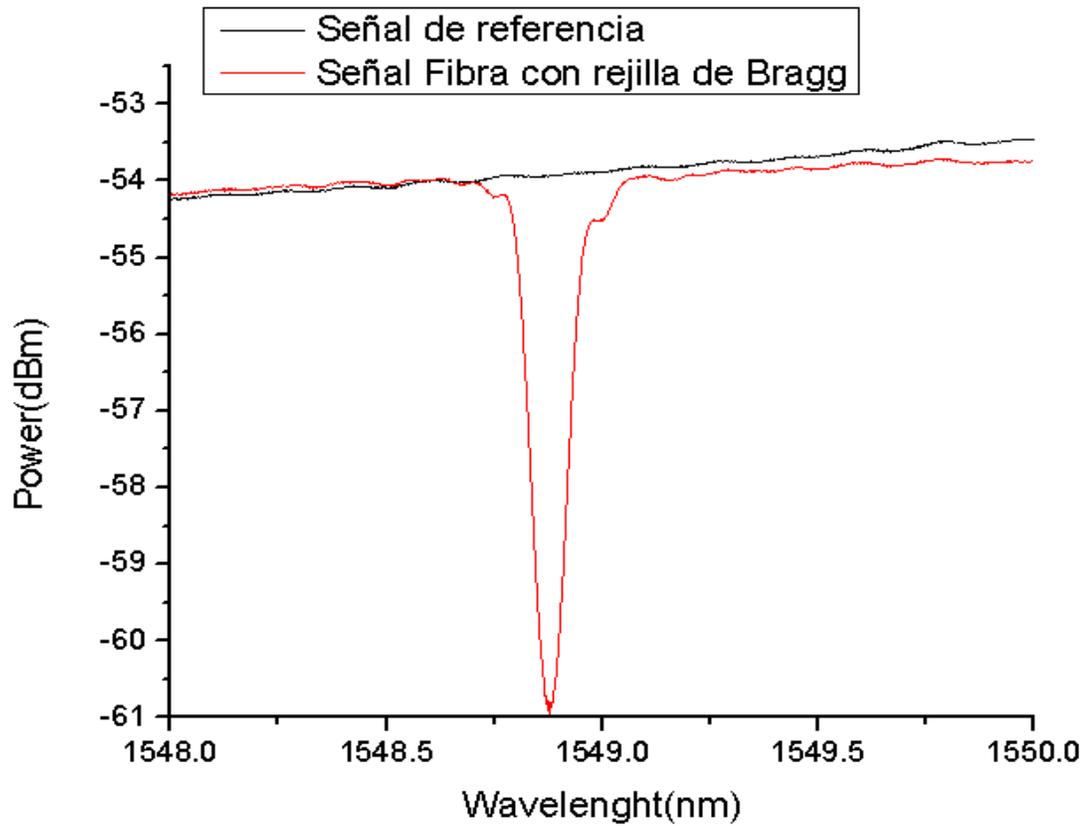


Fig.3.8 Señal resultante de una fibra con grabado de rejillas de Bragg

### 3.1.4 – Fibra de cristal fotónico

Como ya se describió en la sección anterior existen un tipo de fibras ópticas especiales que no son sólidas completamente, tienen canales de aire que corren paralelos al núcleo a lo largo de la fibra óptica. Cuando estas fibras se adelgazan los canales de aire se pueden colapsar en la zona de calentamiento, generando una sección sólida. En este cilindro sólido la luz se propaga en un régimen multimodal. Es decir se puede excitar más de un modo, estos modos tienen una constante de propagación individual, por lo que cada una tiene un índice de refracción efectivo. En términos prácticos se podría decir cada modo viaja por caminos ópticos distintos y al acoplarse nuevamente al núcleo de la fibra estos modos interfieren, dando lugar a una modulación del espectro de transmisión. Es una manera alternativa de construir un interferómetro Mach-Zehnder.

Elaboración del Taper: Utilizando una fibra de cristal fotónico, Taper a 35 $\mu$ m. Analizamos en reflexión empalmado a un circulador de fibra monómodo. La fibra de cristal fotónico tiene un aspecto como el mostrado en la figura 3.8.

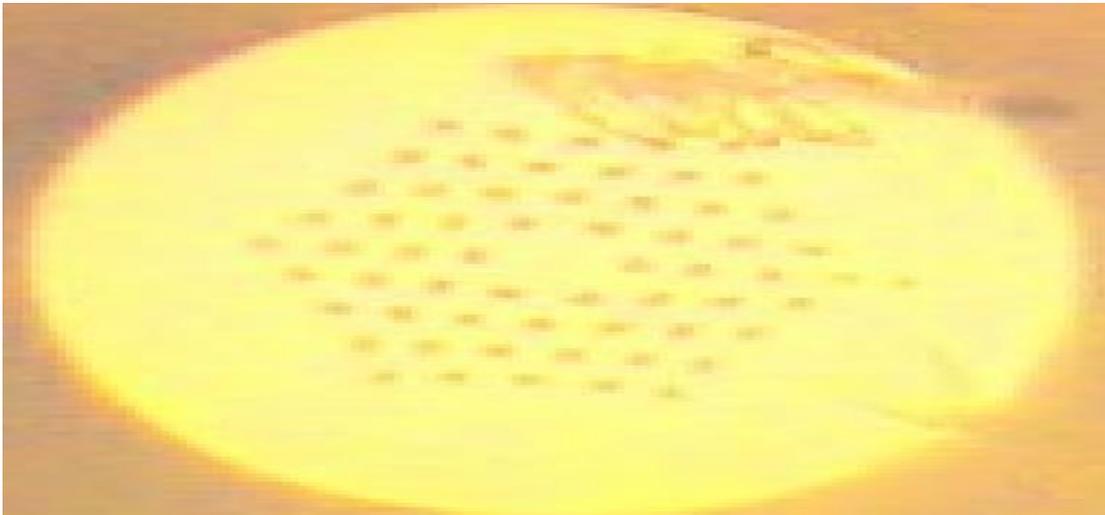


Fig. 3.9 Imagen vista a través de un microscopio que muestra la forma en la que está fabricada una fibra de cristal fotónico

Antes de iniciar con el proceso de Taper, se tomó la respuesta en reflexión a través de un circulador, usando una fuente de luz LED A 1550nm, por lo que obtuvimos la señal de la figura 3.9:

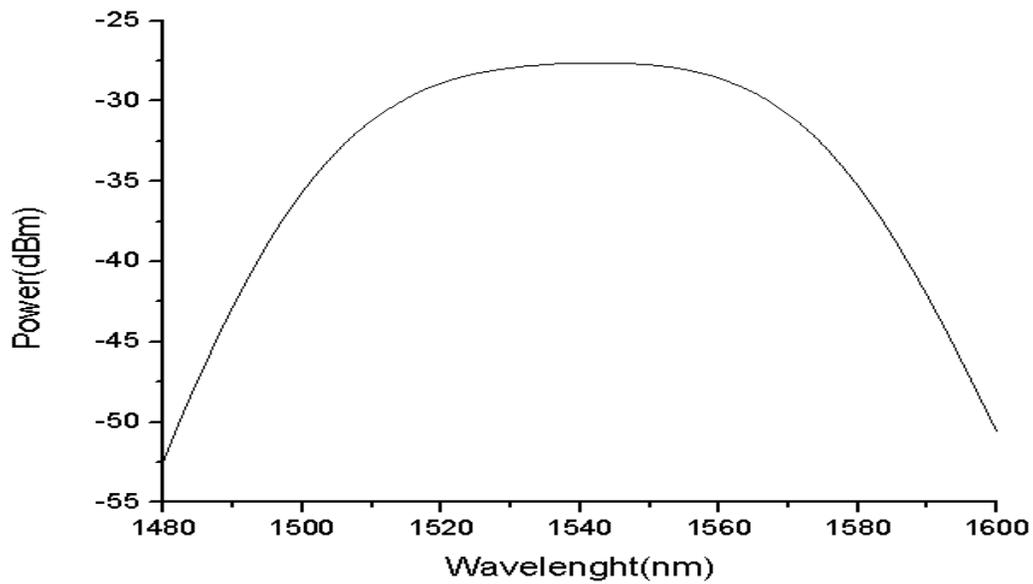


Fig. 3.10 Señal resultante de una fibra óptica conectada a una fuente de luz de 1550 nm

Al finalizar el taper, calculado a 35  $\mu\text{m}$ , obtuvimos la respuesta mostrada en la figura 3.10:

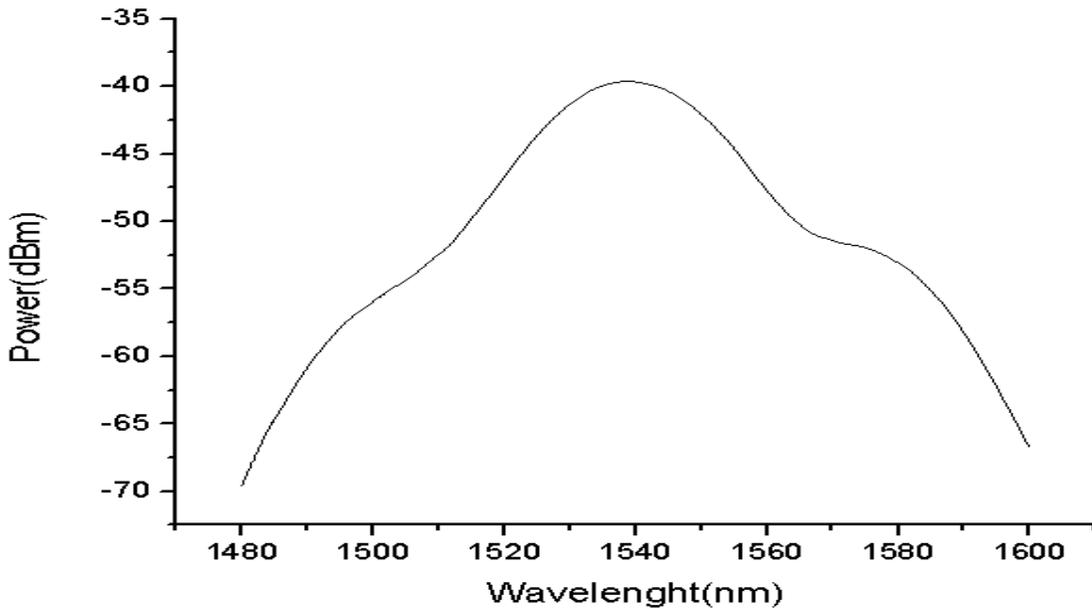


Fig. 3.11 Señal resultante de una fibra estrechada a 35  $\mu\text{m}$

Es muy difícil obtener la misma señal en cada Taper, pero si se espera obtener una señal parecida en cuanto a su forma, ya que siempre va a depender de los modos que interfieren en la zona adelgazada, por lo que no se consigue

una señal de respuesta exacta a la anterior. Por ejemplo, la señal obtenida de otro Taper es el mostrado en la figura 3.11:

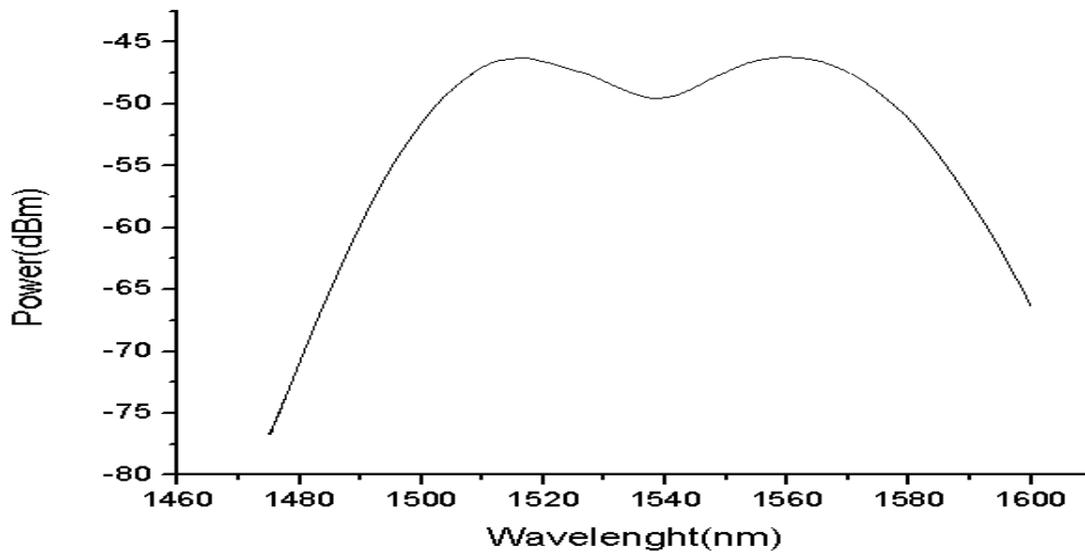


Fig. 3.12 Señal resultante de una fibra estrechada nuevamente a 35  $\mu\text{m}$ .

Una vez esto, se prepara una pequeña capa de PDMS para cubrir solo la mitad de la parte adelgazada, y dejar que cure completamente.

Preparación del PDMS: La preparación básica del PDMS consiste en usar al menos un 10% de agente curador respecto a la cantidad de silicón. Para este esquema, necesitamos un gramo de silicón, por lo tanto, un 0.1 gr de agente curador. Usando una báscula de alta precisión se dispone a hacer la mezcla.

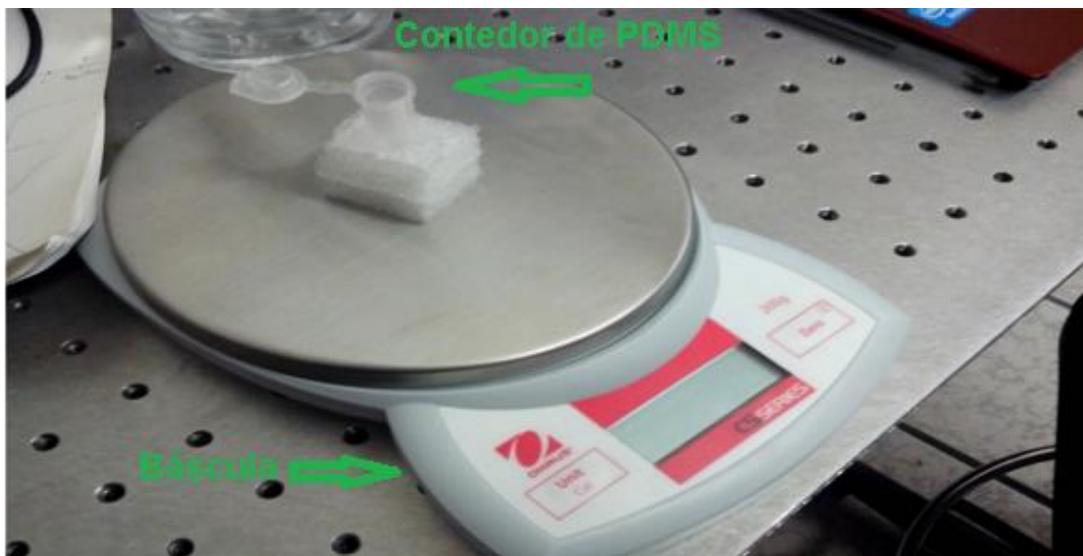


Fig. 3.13 Báscula y contenedor de PDMS

Una vez hecho esto, la mezcla debe revolverse por alrededor de 5 minutos, para asegurar que las dos sustancias queden mezcladas completamente.

Después, aplicamos una fina capa de PDMS sobre un porta-objetos.

Ahora se dispone a conectar la fibra al interrogador óptico con el que se tomarán las medidas que se realizarán. Debido a que está conectada a una fibra monomodo estándar, esta debe empalmarse con el Taper de cristal fotónico, y por consiguiente, el empalme debe hacerse de manera manual, ya que en automático la empalmadora no es capaz de enfocar las fibras.

El empalme manual queda se muestra en la figura 3.12:

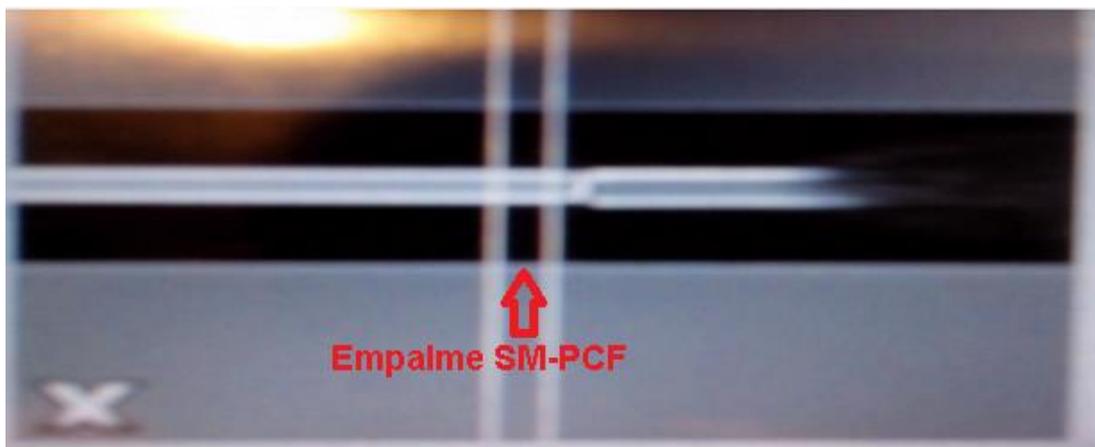


Fig. 3.14 Empalme de fibra monomodo con fibra de cristal fotónico

Ya que la fibra está empalmada, la colocamos debidamente estirada en la estructura mostrada en la figura 3.13:

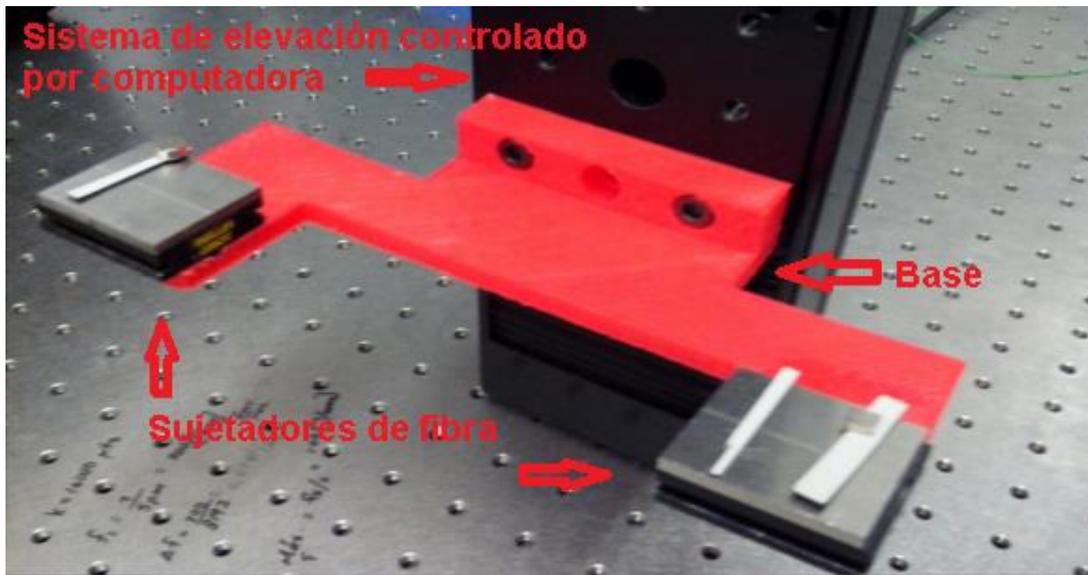


Fig. 3.15 Sistema utilizado para depositar la fibra en el PDMS

Utilizamos un sistema de motores para situar la fibra justo donde se ubica el PDMS.

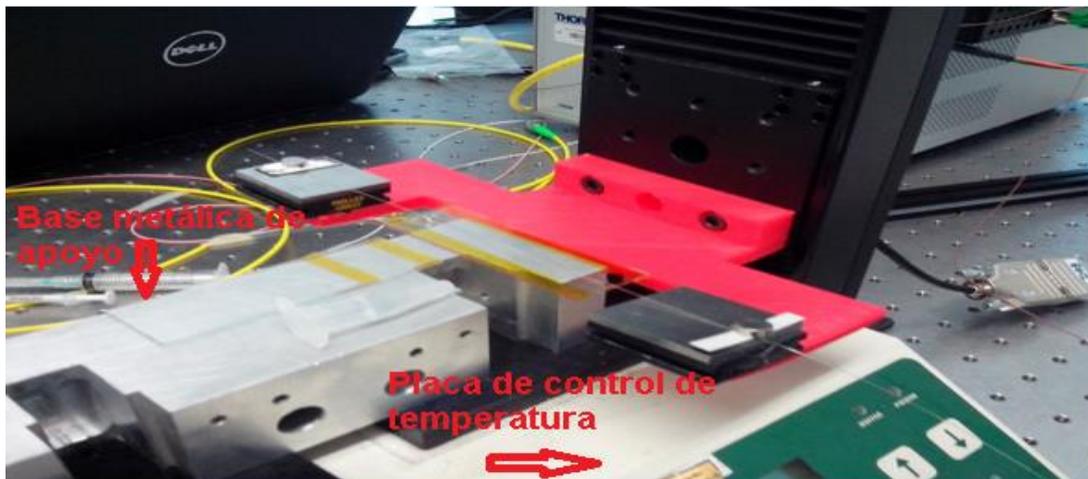


Fig. 3.16 Sistema descansando sobre una placa de metal encima de la placa calentadora

Usando este método, nos aseguramos que el Taper toca el PDMS, pero no se sumerge completamente, sino que solo la parte inferior queda adherida al PDMS como una fina película.

Colocamos el PDMS restante en ambos lados del porta-objetos, de manera que se vaya distribuyendo hacia el interior de la fibra, y de esta manera el

Taper (ubicado en el centro) sea la única parte descubierta. La figura 3.15 nos muestra el Taper con el PDMS. Esto nos ayudará a que la estructura quede más resistente, puesto que cuando el PDMS quede curado, se comportará como un sólido.

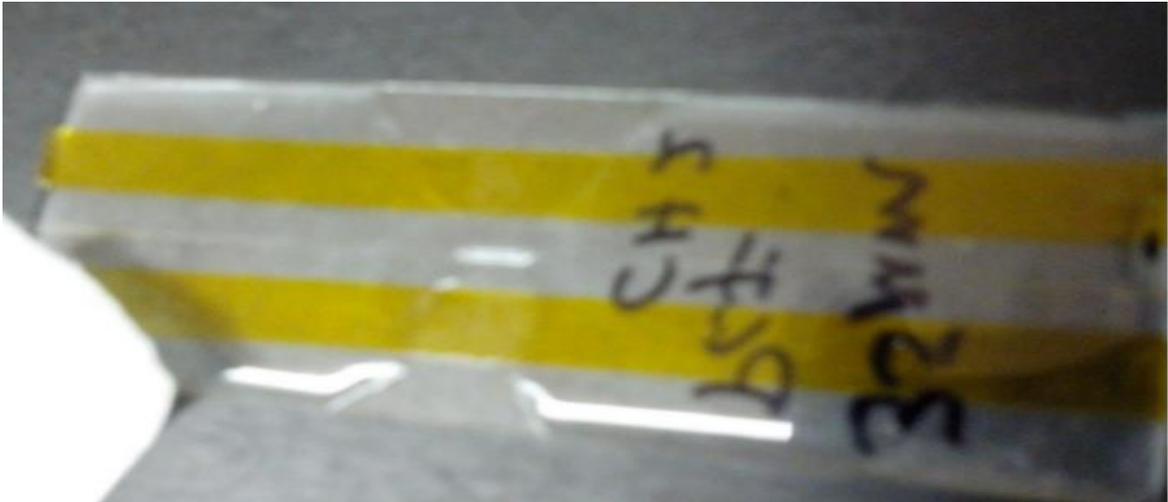


Fig. 3.17 Taper depositado sobre el PDMS ya curado

La figura 3.16 nos muestra la señal resultante obtenida de un interrogador óptico una vez que el PDMS está curado:

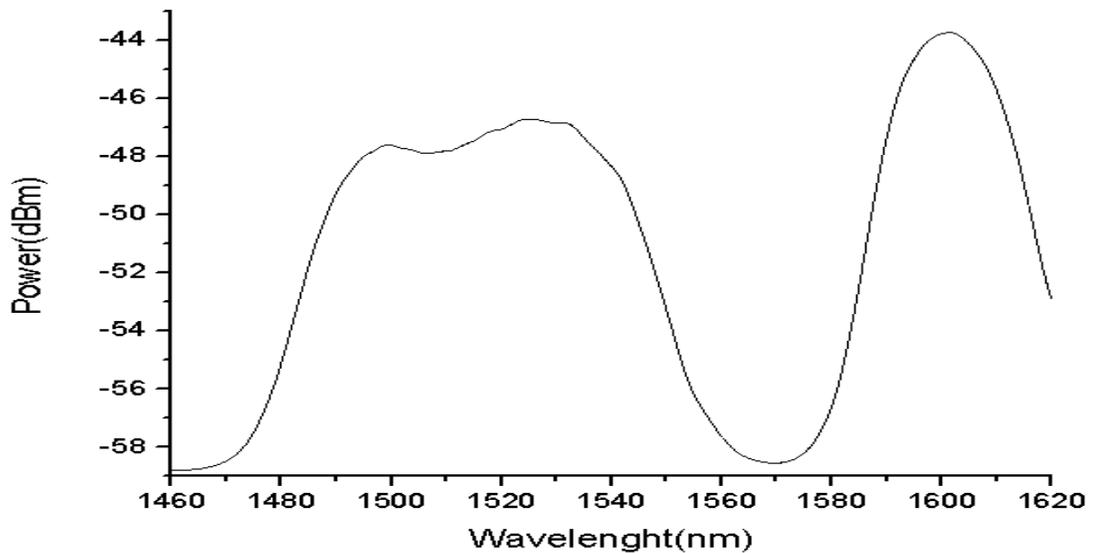


Fig. 3.18 Señal obtenida del Taper una vez depositado sobre el PDMS

A partir de acá, se dispone a empezar las pruebas de temperatura e índice de refracción.

# CAPITULO

# 4

## 4.1 Resultados

### 4.1.1 – Taper de fibra óptica monomodo

Debido a que la etapa de sensado de temperatura iba a llegar en la parte de implementación del PDMS, se tenía que asegurar que el sensado de cambios de índice de refracción se produjera con el Taper solamente. Las sustancias que probadas fueron: Agua( $n=1.333$ ), Etanol( $n=1.36$ ), Alcohol Isopropilico( $n=1.3756$ ), y Acetona( $n=1.36$ ). La figura 4.1 muestra el resultado de la prueba con estos líquidos. Como ya se mencionó, la fibra utilizada es un Taper de 19.5  $\mu\text{m}$ , puesto que es la que mostraba una mejor respuesta.

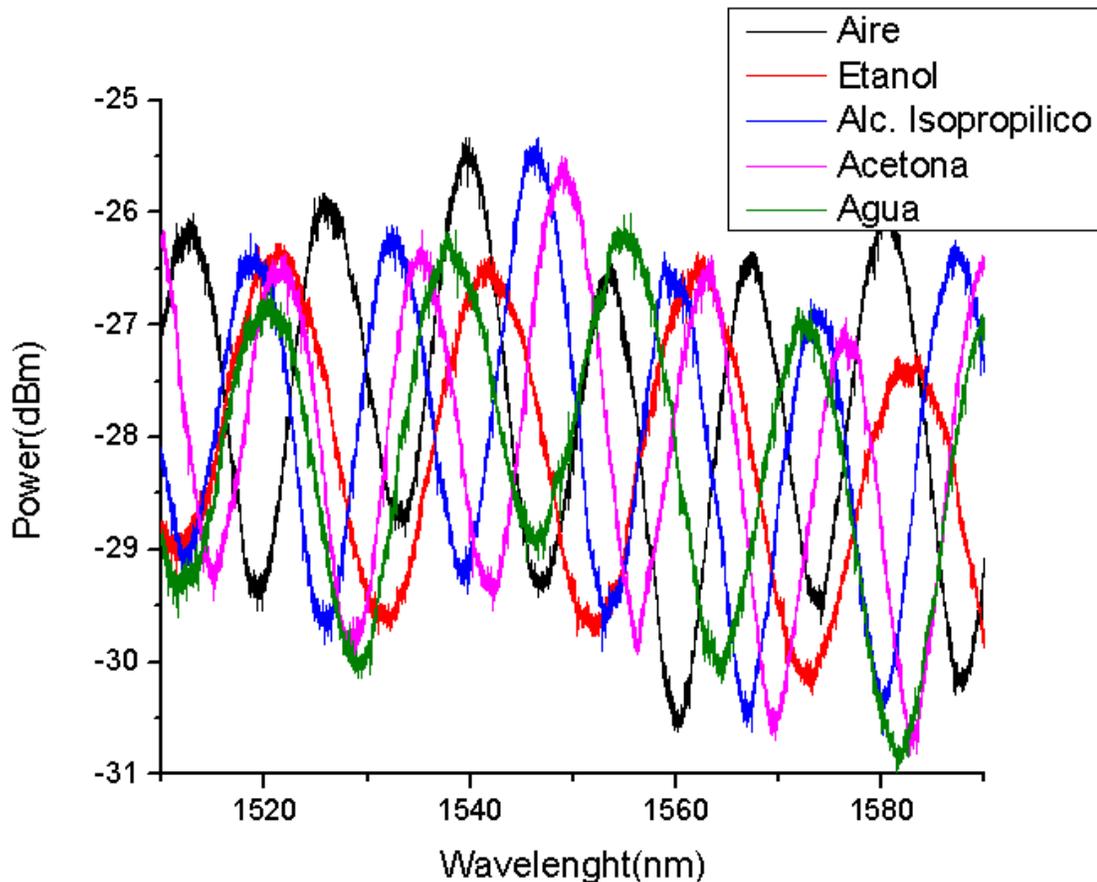


Figura 4.1 Gráfica resultante de prueba con etanol, acetona, agua y alcohol Isopropilico

Podemos ver que la señal sufre un desplazamiento sobre el eje horizontal, pero desafortunadamente se hace irreconocible identificar hacia donde se dirige dicho desplazamiento, y fue por esta razón que se optó por empezar a probar otras técnicas.

#### 4.1.2 – Rejillas de Bragg

No se hicieron pruebas de índice de refracción ni temperatura por la técnica de 2 Tapers, ya que, como se vio en el procedimiento, la señal no era adecuada para someterla a dichas pruebas.

Lo primero en probarse con el método de rejillas de Bragg, fue las pruebas de temperatura, ya que las rejillas de Bragg ya son sensibles a temperatura. Los resultados arrojados para pruebas de temperatura se muestran en las figuras 4.2 y 4.3:

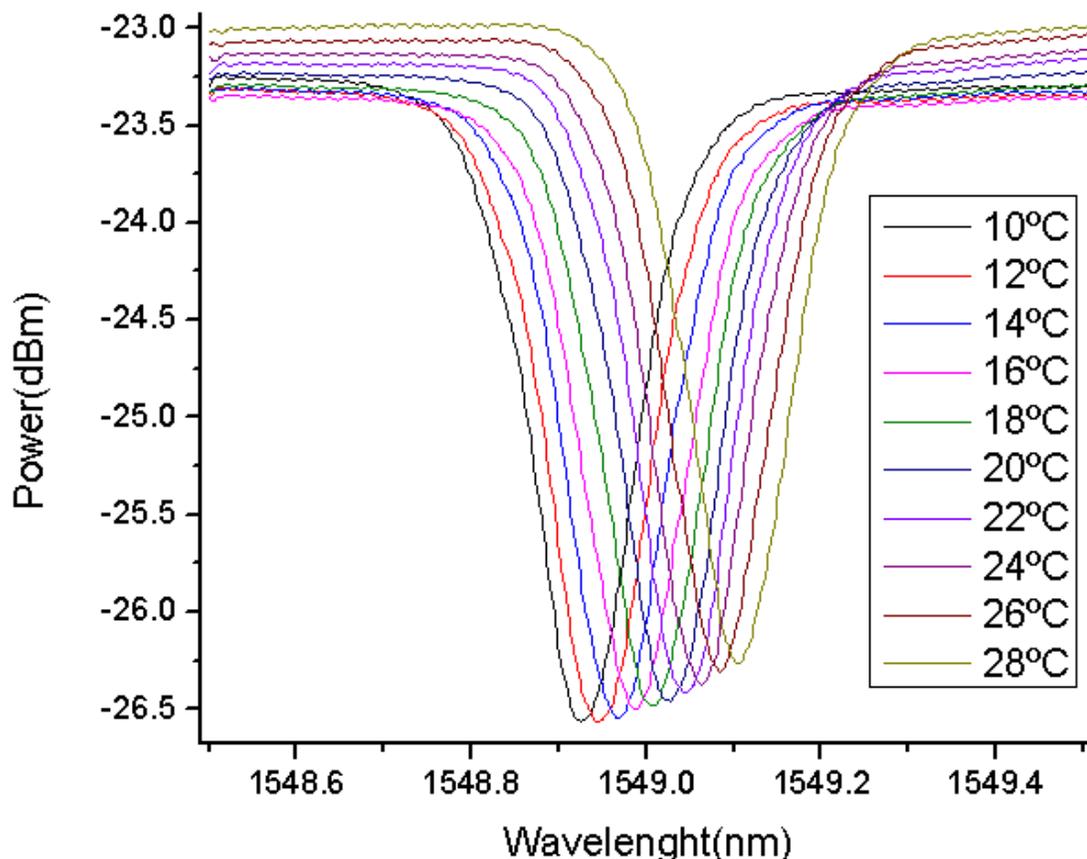


Figura 4.2 Gráfica resultante de pruebas de temperatura de Rejillas de Bragg (10°C-28°C)

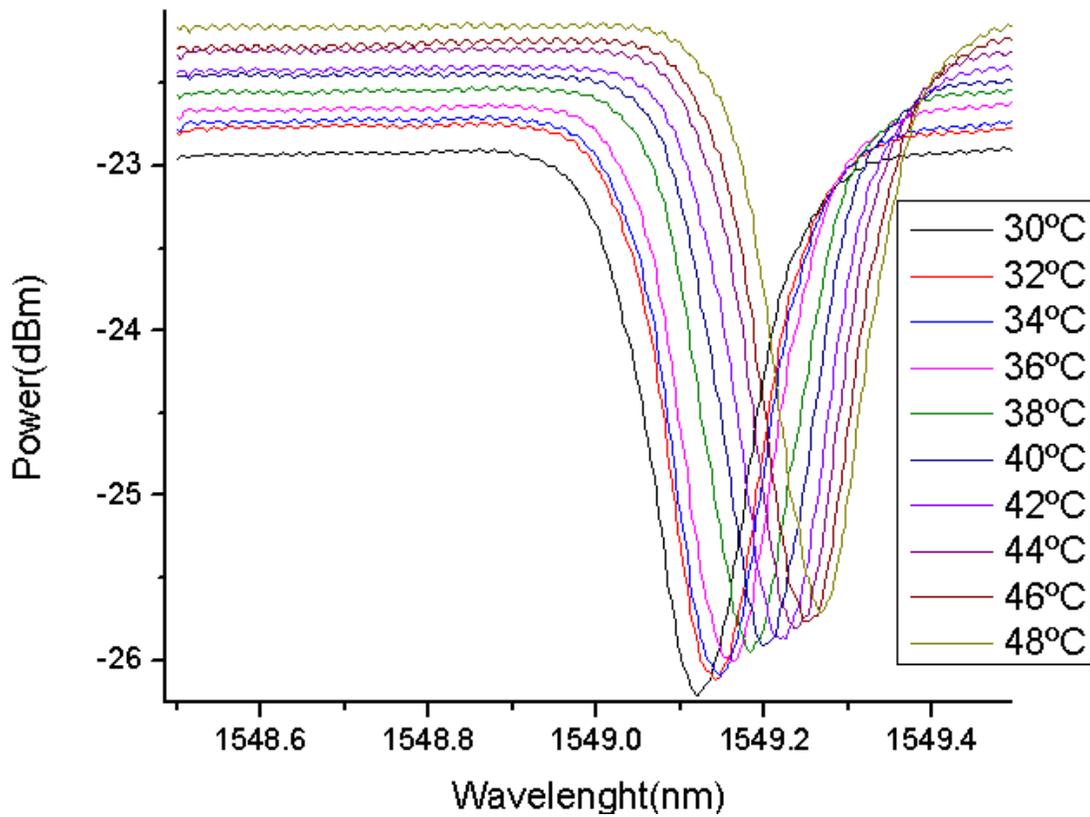


Figura 4.3 Gráfica resultante de pruebas de temperatura de Rejillas de Bragg (30°C-48°C)

Podemos notar que efectivamente, la respuesta a cambios de temperatura es constante, y se aprecia como un desplazamiento sobre el eje x, así como también debe considerarse el margen de error que se genera en su amplitud.

La figura 4.4 nos muestra la gráfica característica tomando los puntos sobre el eje x de los picos de cada señal.

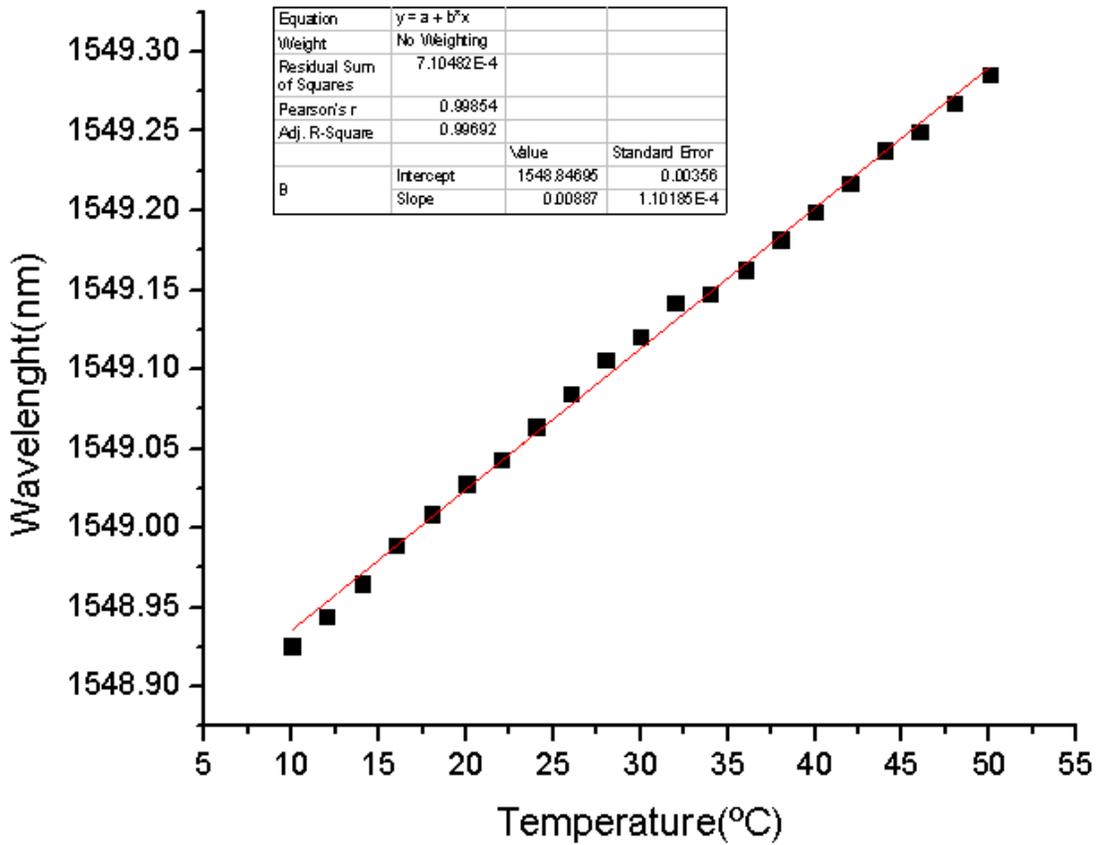


Figura 4.4 Gráfica característica de la prueba de temperatura con rejillas de Bragg

Podemos apreciar que la pendiente es de 0.00887 nm/°C o 8.87pm/°C. El comportamiento es lineal como se puede ver del análisis que arroja el programa usado para el ajuste, de 0.998, muy cercano a 1 que es el valor ideal, con lo que determinamos que el sensado de temperatura es capaz de medir variaciones de temperatura de manera constante.

En el anexo 5 se puede ver la respuesta de señal de otra fibra de Bragg que se llegó a probar, solo que esta medida en reflexión, obteniendo valores muy similares.

Una vez obtenidos estos datos, se continúa con medir cambios de índices de refracción, usando aceites calibrados a un índice de refracción específico. La figura 4.5 nos muestra la gráfica resultante de estas pruebas.

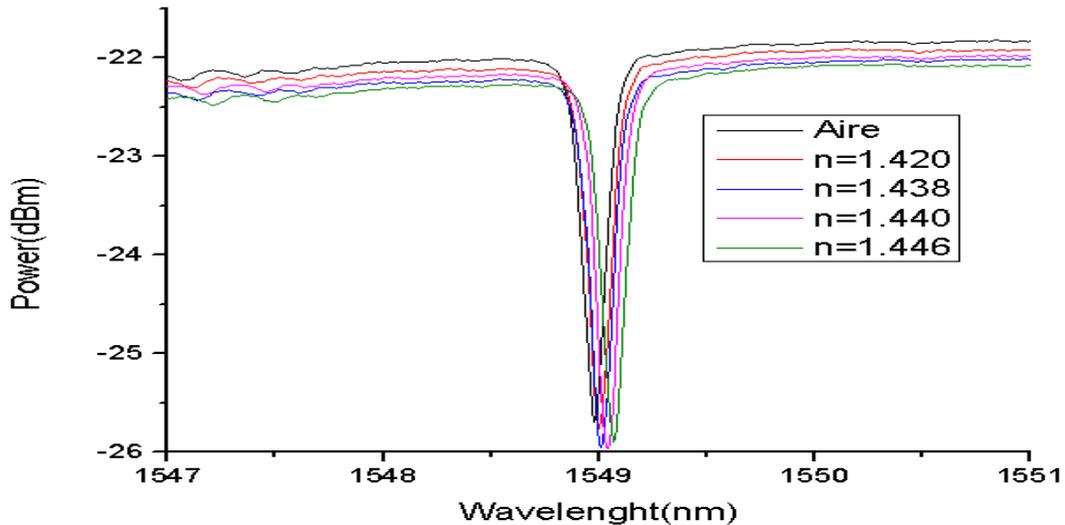


Figura 4.5 Gráfica obtenida de las pruebas de índice de refracción con rejillas de Bragg

Y se obtuvo la gráfica característica tomando los puntos de los picos, mostrada en la figura 4.6:

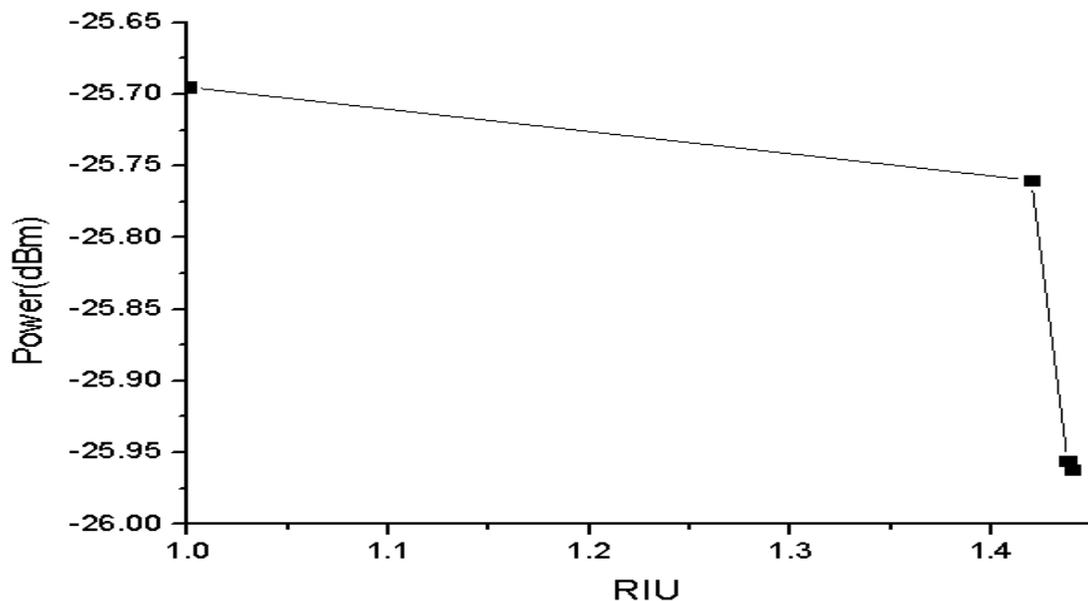


Figura 4.6 Gráfica característica de pruebas de índice de refracción con rejillas de Bragg

Se puede apreciar que los incrementos/decrementos no son de manera constante ni tampoco cuentan con una sensibilidad aceptable, por lo que no

se puede utilizar este método para la medición de cambios de índice de refracción.

#### 4.1.3 – Fibra de cristal fotónico

Analizando la gráfica vista en el procedimiento, procedemos a analizar el primer pico que se ve en la gráfica, puesto que este es el que reacciona de mejor manera a estos cambios, la figura 4.7 nos muestra la gráfica resultante de las pruebas a cambios de índice de refracción, y la figura 4.8 las pruebas a cambios de temperatura.

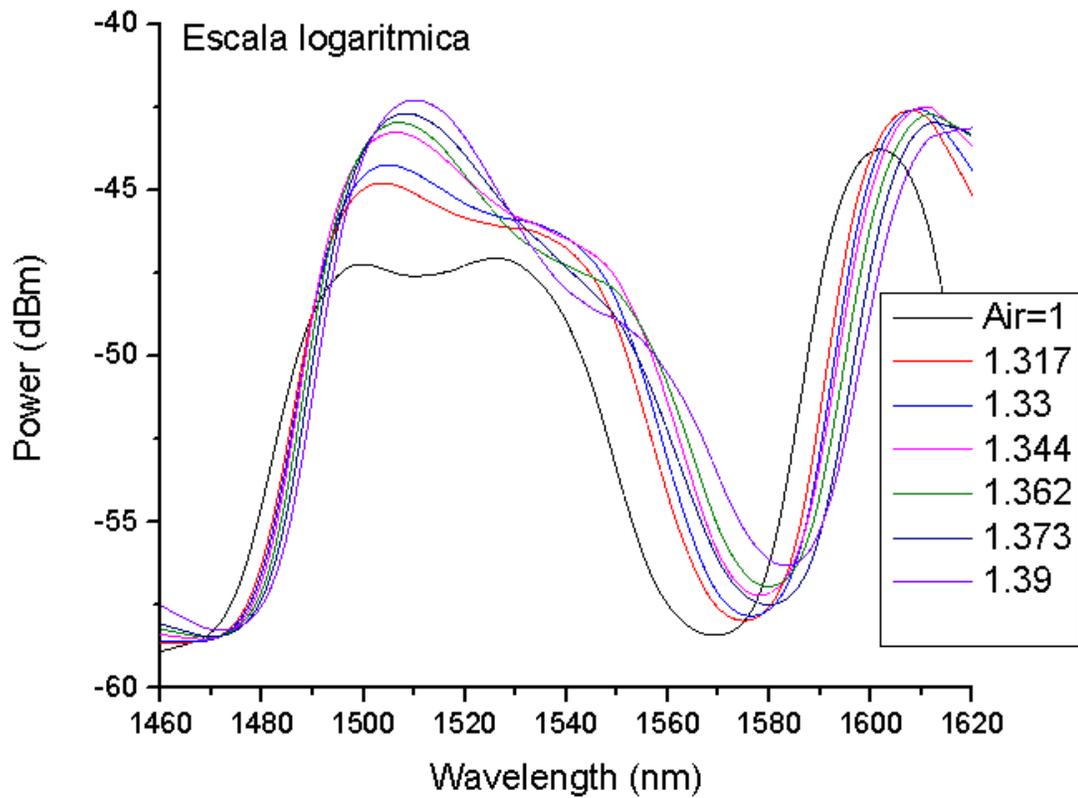


Figura 4.7 Gráfica resultante de pruebas de índice de refracción con Fibra Taper de cristal fotónico

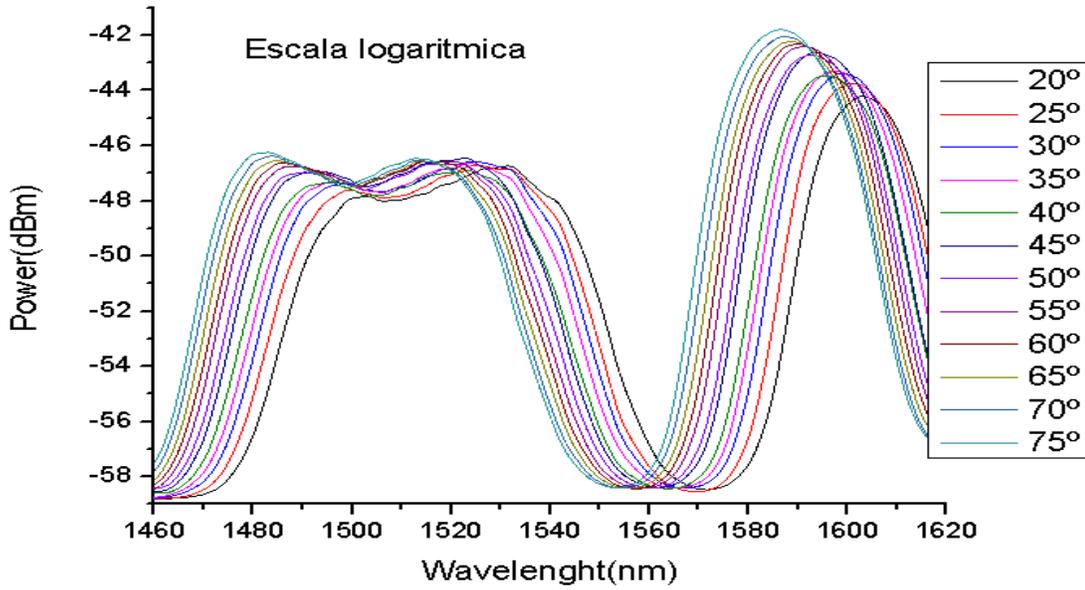


Figura 4.8 Gráfica resultante de pruebas de temperatura con Fibra Taper de cristal fotónico

Analizando los puntos en amplitud del primer pico, obtenemos la gráfica característica tanto en temperatura (sacando los puntos de acuerdo al eje x) y a índices de refracción (sacando los puntos de acuerdo al eje y) mostrados en la figura 4.9 y 4.10 respectivamente.

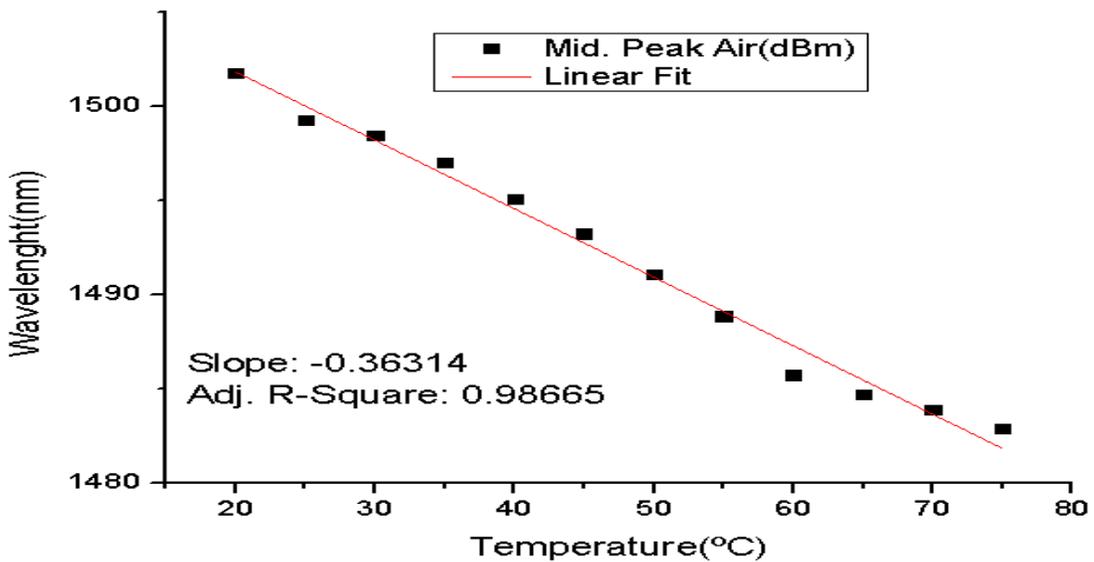


Figura 4.9 Gráfica característica de comportamiento a temperatura de la fibra Taper de cristal fotónico

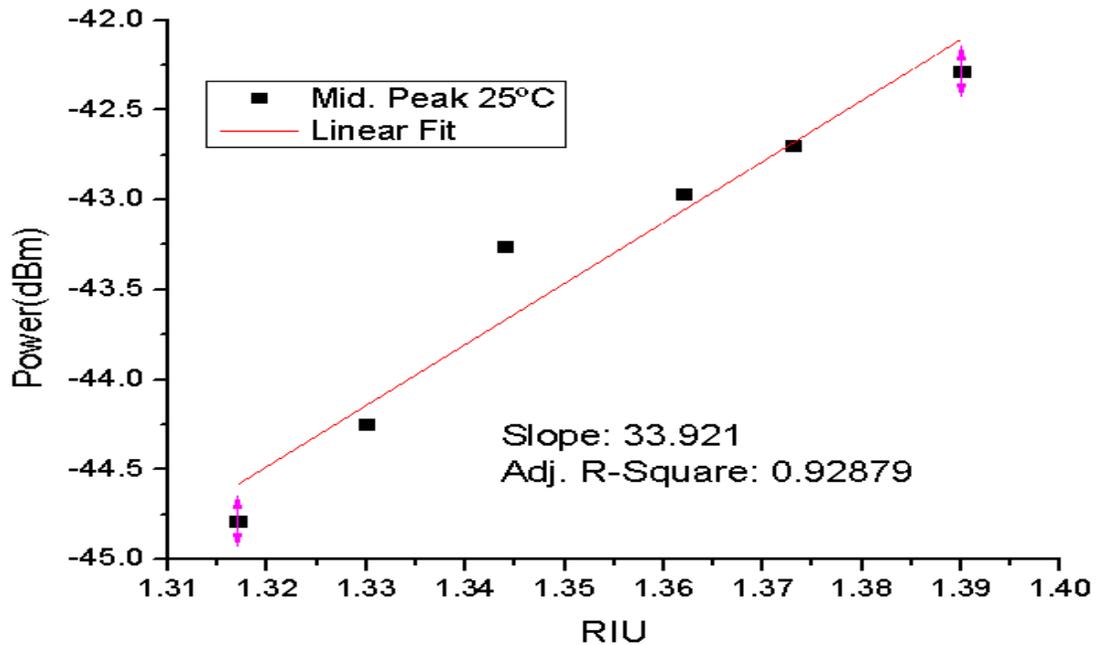


Figura 4.10 Gráfica característica de comportamiento a RI de la fibra Taper de cristal fotónico

Podemos observar como las pruebas de temperatura nos da una pendiente casi perfecta, por lo que el sensado de este parámetro funciona de manera correcta. Aunque la pendiente en cambios de índice de refracción no es tan cercana a 1 como en las pruebas de temperatura, sigue siendo un valor aceptable. De esta manera es como, observando que para ambos parámetros la señal se comporta de manera diferente, es como se puede monitorear simultáneamente índices de refracción y temperatura. A pesar de esto, para ambos parámetros hay un margen de error que se debe considerar, puesto que a cambios de temperatura la señal tiene un ligero cambio en su amplitud, así como para cambios de índice de refracción, la señal tiene un ligero cambio en desplazamiento. El ajuste de error que debe considerarse para cada uno de los parámetros es mostrado en las gráficas de las figuras 4.11 y 4.12

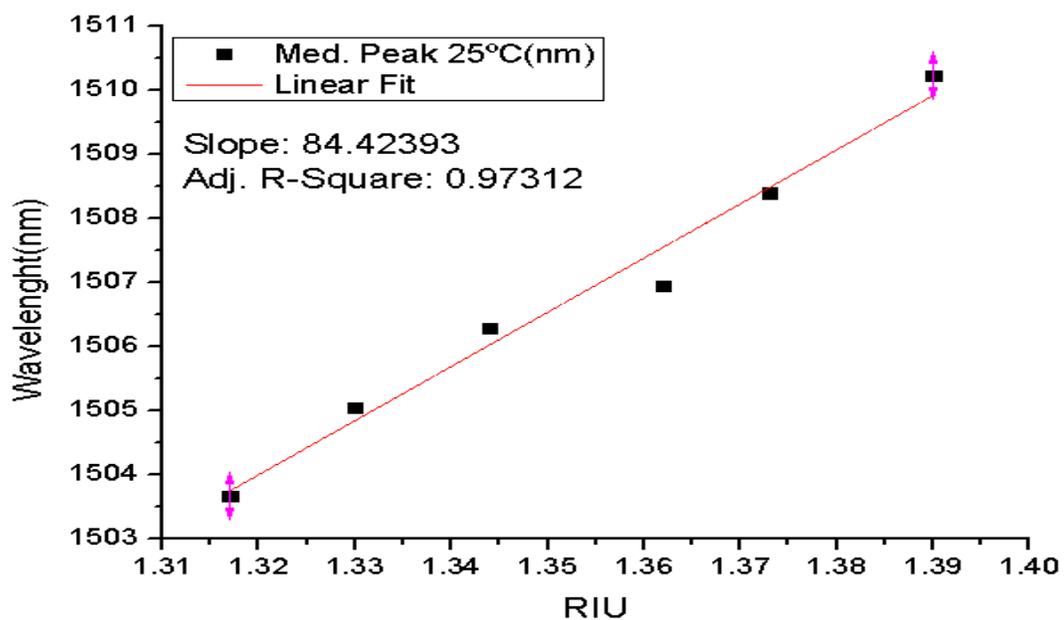


Figura 4.11 Gráfica característica del margen de error en pruebas de temperatura de la fibra Taper de cristal fotónico

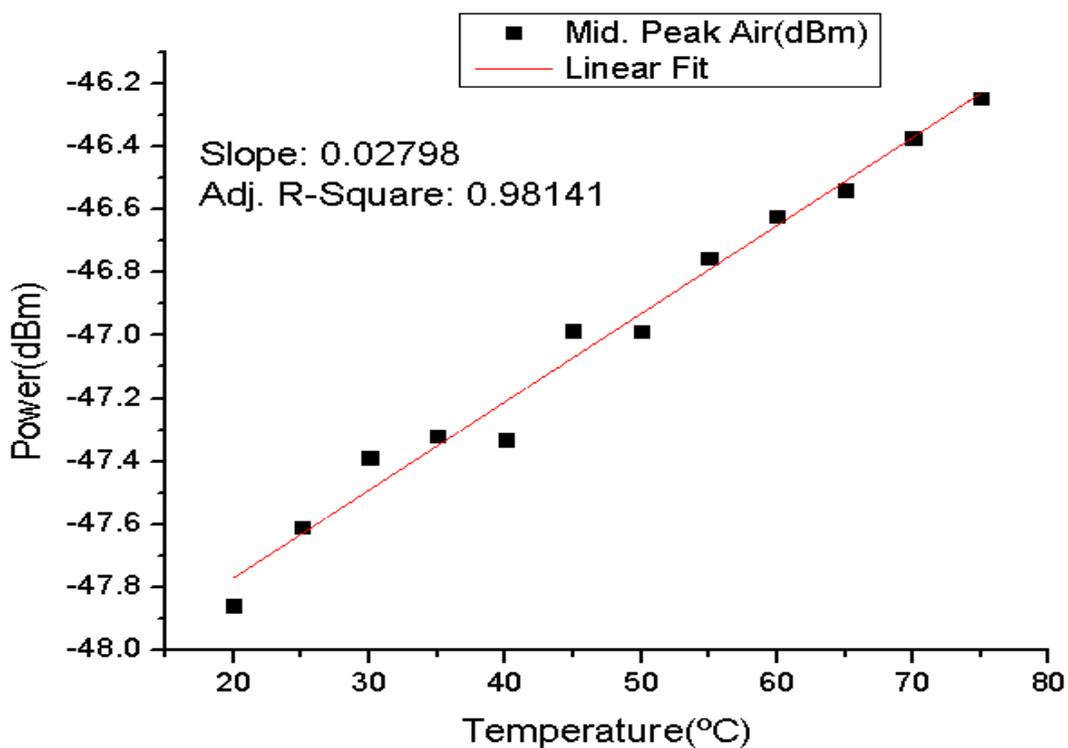


Figura 4.12 Gráfica característica del margen de error en pruebas de índice de refracción de la fibra Taper de cristal fotónico

La última prueba realizada, para comprobar la medición simultánea de índice de refracción y temperatura, fue hacer las pruebas de temperatura con el Taper sumergido en agua, mostrada en la figura 4.13 y su gráfica característica de comportamiento en la figura 4.14, puesto que de esta forma no solo se analiza la señal sumergida en agua, sino que observamos los cambios del índice del agua ocasionados por la temperatura.

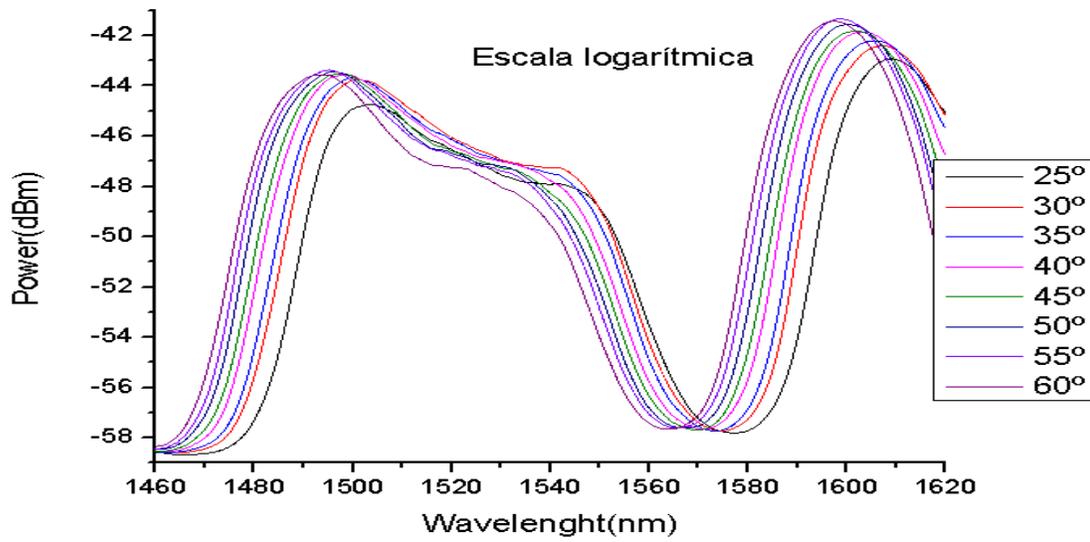


Figura 4.13 Gráfica resultante de prueba de temperatura de fibra Taper de cristal fotónico sumergido en agua

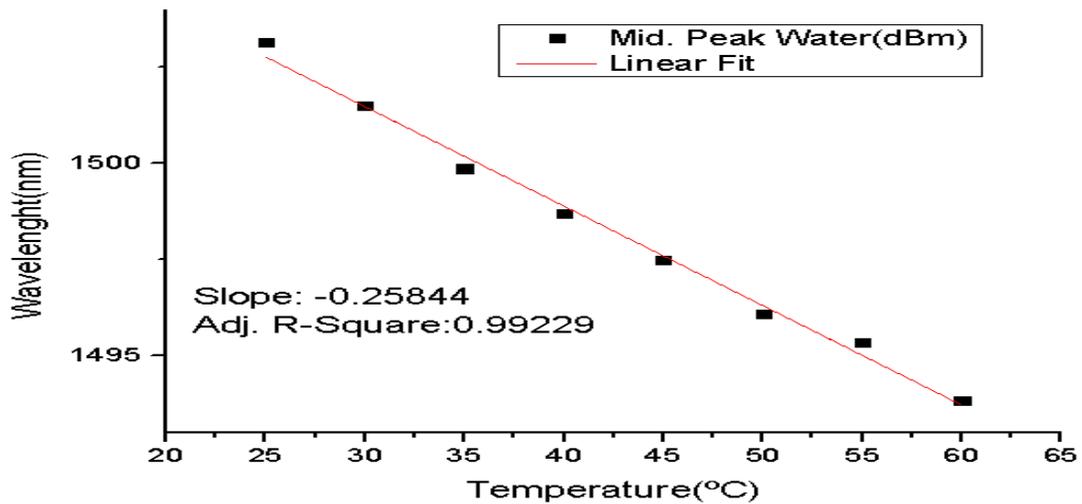


Figura 4.14 Gráfica característica de comportamiento a prueba de temperatura sumergida en agua de la fibra Taper de cristal fotónico

La figura 4.15 nos muestra el margen de error en cuanto a amplitud que debe considerarse para las pruebas de índice de refracción.

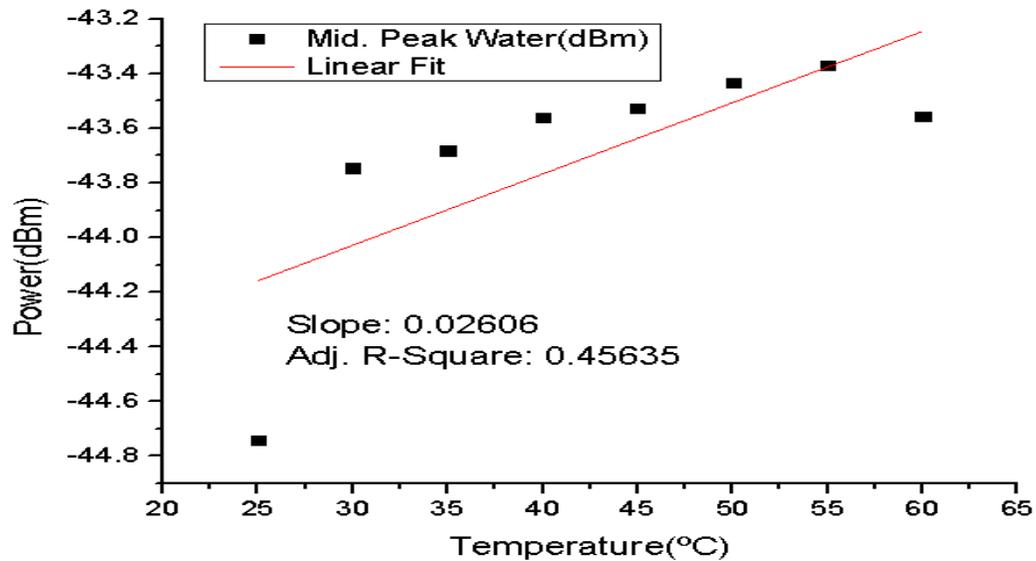


Figura 4.15 Margen de error considerado para las pruebas de temperatura en cuanto a índice de refracción de la fibra Taper de cristal fotónico sumergido en agua

Podemos observar como las pruebas de temperatura tienen mejor respuesta, y que los cambios en amplitud son en sentido opuesto al comportamiento a cambios de índice de refracción del Taper, por lo que hace aún más confiable la medición obtenida.

## 4.2 Conclusiones y recomendaciones

**Conclusión:** En el desarrollo del proyecto se determinó que, basándonos en el procedimiento utilizado, la fibra Taper tiene una reacción diferente tanto a cambios de temperatura como a cambios de índices de refracción. A cambios de temperatura sufre un desplazamiento sobre el eje horizontal a mayor temperatura, la gráfica muestra un efecto de desplazamiento hacia la derecha, y viceversa.

Por otro lado, podemos observar como la respuesta de la señal de la fibra Taper a cambios de índice de refracción, la señal se ve afectada en su amplitud, que va aumentando a medida que el índice de refracción incrementa, y viceversa.

En conclusión, lo antes mencionado demuestra que ambos parámetros presentan variaciones diferentes en la señal medida, por lo que pueden ser identificables y medibles. Como puede notarse, ambos parámetros presentan un margen de error, puesto que en las pruebas de temperatura también se da un desplazamiento en el eje y, así como en las pruebas de cambios en índice de refracción, se nota un cambio en el desplazamiento sobre el eje x, por lo que en ambos casos se debe tomar en cuenta ese margen de error para tomar las medidas exactas.

En el transcurso del proyecto se logró entender cómo es que la temperatura influye directamente a las variaciones de índice de refracción de la sustancia medida, y como determinar esas variaciones. De esta manera, nosotros podemos saber en todo momento, cuando las variaciones de índice de refracción que se presentan al momento de la medición son afectadas por alguna variación de temperatura y cuando son por que la sustancia esté siendo contaminada con algún otro medio.

**Recomendaciones:** Las técnicas utilizadas durante la residencia profesional pueden ser mejoradas para lograr obtener un mayor nivel de eficiencia y fiabilidad en el momento de la medición. Algunas de las recomendaciones son:

1. Tener una medida estándar del Taper, es decir, determinar cuál es el diámetro apropiado logrando obtener un balance entre buena sensibilidad sin llegar a demasiada modulación de la misma.
2. Obtener un método más eficiente en el momento donde se trata de dejar solo el centro de la fibra sin rellenar de PDMS, a diferencia del simple cálculo que se hacía de la cantidad de PDMS utilizar.
3. Garantizar la limpieza completa y eficaz del Taper a la hora de cambiar las sustancias a medir, asegurándonos que las propiedades de la fibra sean las de sus condiciones iniciales.

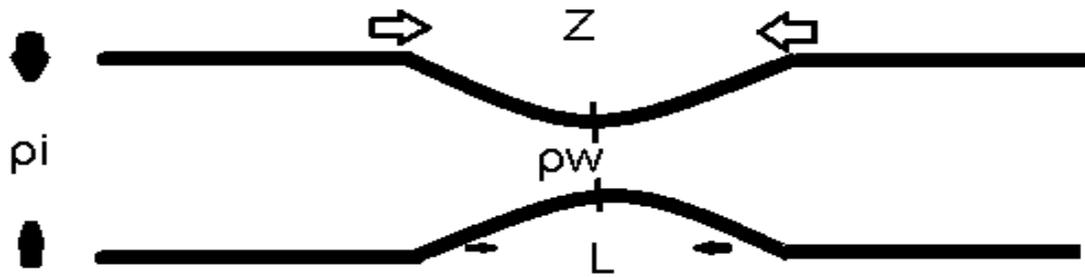
4. De las más importantes, sin importar el método utilizado, tener un reglamento definido del proceso de fabricación, que sea lo más parecido uno con otro, para así tener mayor certeza que los resultados obtenidos son de lo más fiable.

### 4.3 Referencias bibliográficas

1. Dow Corning Corporation, Sylgard® 184 Silicone Elastomer, dowcorning.com, 2013
2. Max Born and Emil Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, Sixth Edition, 1980.
3. Daniel Malacara Hernández, Óptica Básica, Fondo de Cultura Económica, 2da Edición (2004).
4. Chin-Lin Chen, Foundations for guided-wave optics, Wiley 2007.
5. Allen H. Cherin, An introduction to optical fibers, McGraw-Hill, 1983.
6. Jacques Bures, Guided Optics, Wiley VCH, 2009.
7. Joel Villatoro, David Monzón-Hernández, Efraín Mejía-Beltrán, “Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors”, Appl. Opt. Vol 42, No. 13, pp. 2278, (2003).
8. Joel Villatoro and David Monzón Hernández, “Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch”, Journal of Lightwave Technology Vol. 24 No. 3, pp. 1409, (2006).
9. Vladimir Minkovich, Joel Villatoro, David Monzón-Hernández, Sergio Calixto, Alexander Sotsky, Ludmila Sotskaya, “Holey fiber tapers with resonance transmission for high-resolution refractive index sensing”, Optics Express, Vol. 13, No. 19, pp. 7609, (2005).

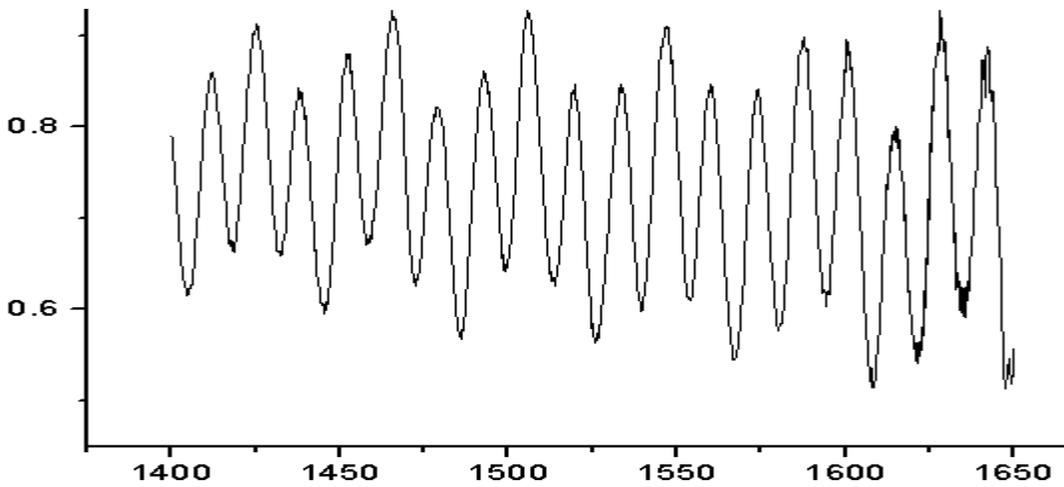
### Anexos

Anexo 1: Fibra monomodo Taper adelgazada a 11.57  $\mu\text{m}$

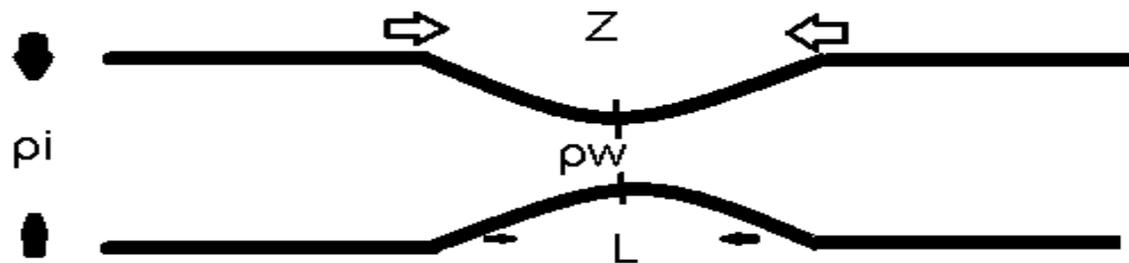


$\rho_i = 14.99 \mu\text{m}$   
 $Z = 3 \text{ mm}$

$\rho_w = 11.57 \mu\text{m}$   
 $L = 6 \text{ mm}$

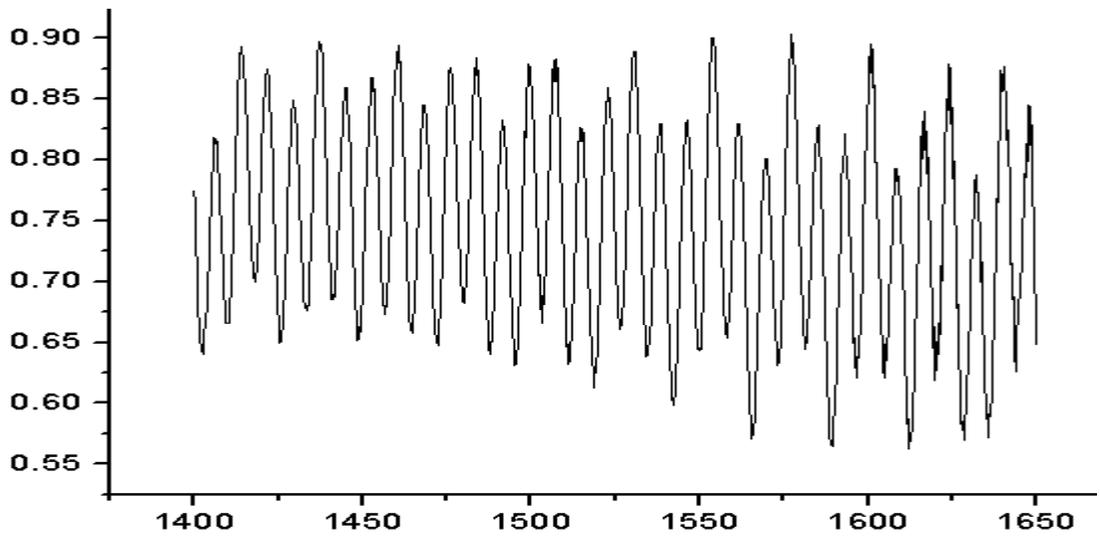


Anexo 2: Fibra monomodo Taper adelgazada a 7.72  $\mu\text{m}$

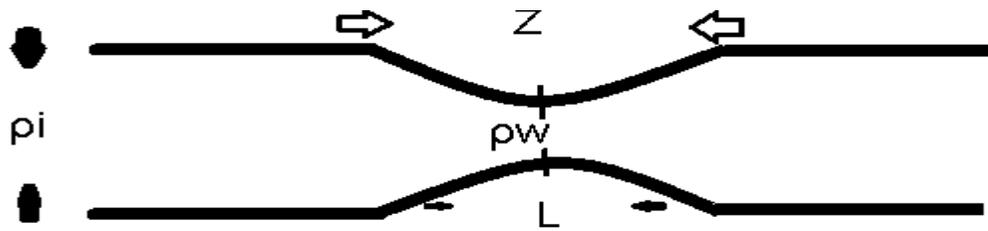


$\rho_i = 9.91 \mu\text{m}$   
 $Z = 3 \text{ mm}$

$\rho_w = 7.72 \mu\text{m}$   
 $L = 6 \text{ mm}$

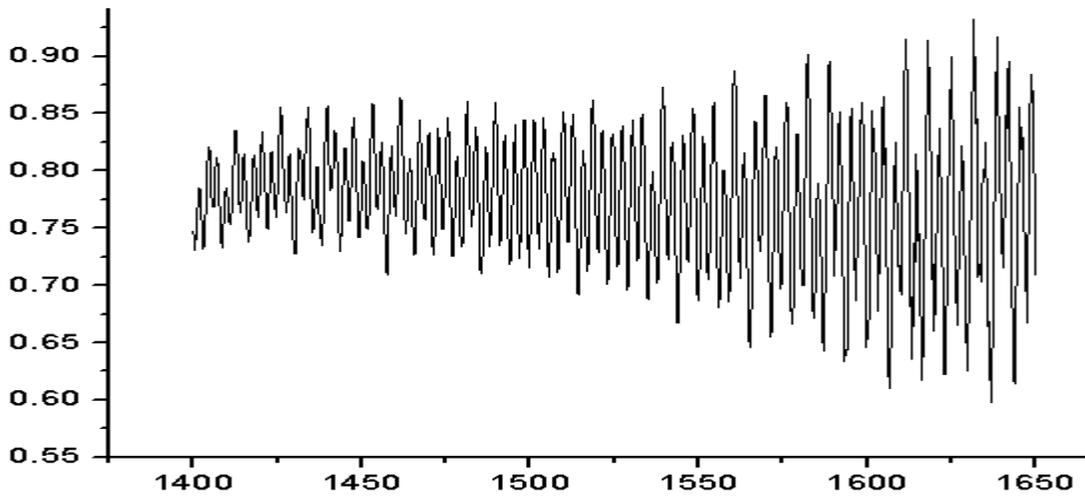


Anexo 3: Fibra monomodo Taper adelgazada a 3.97  $\mu\text{m}$

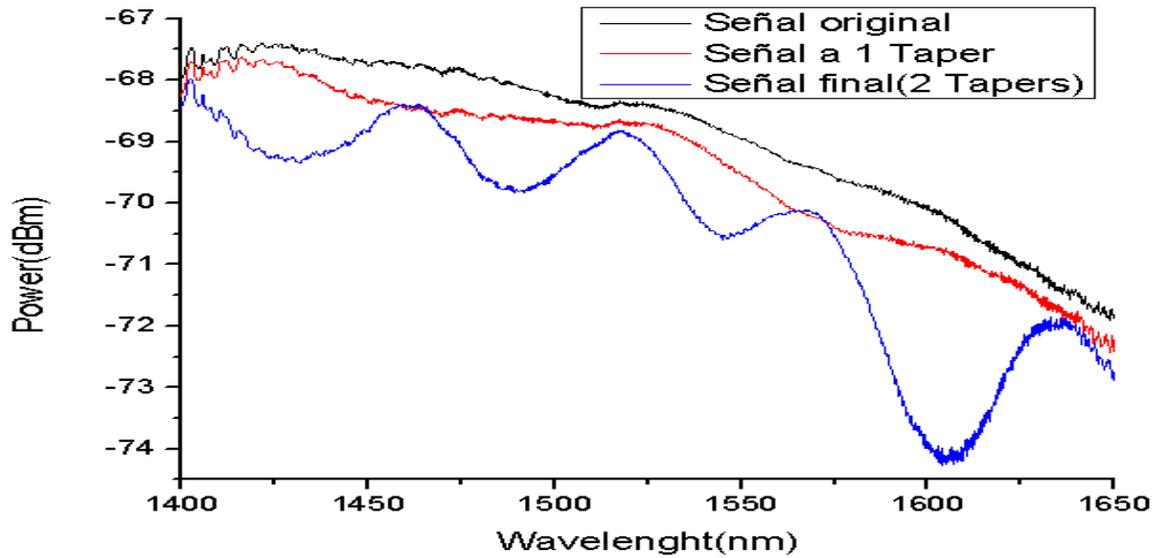
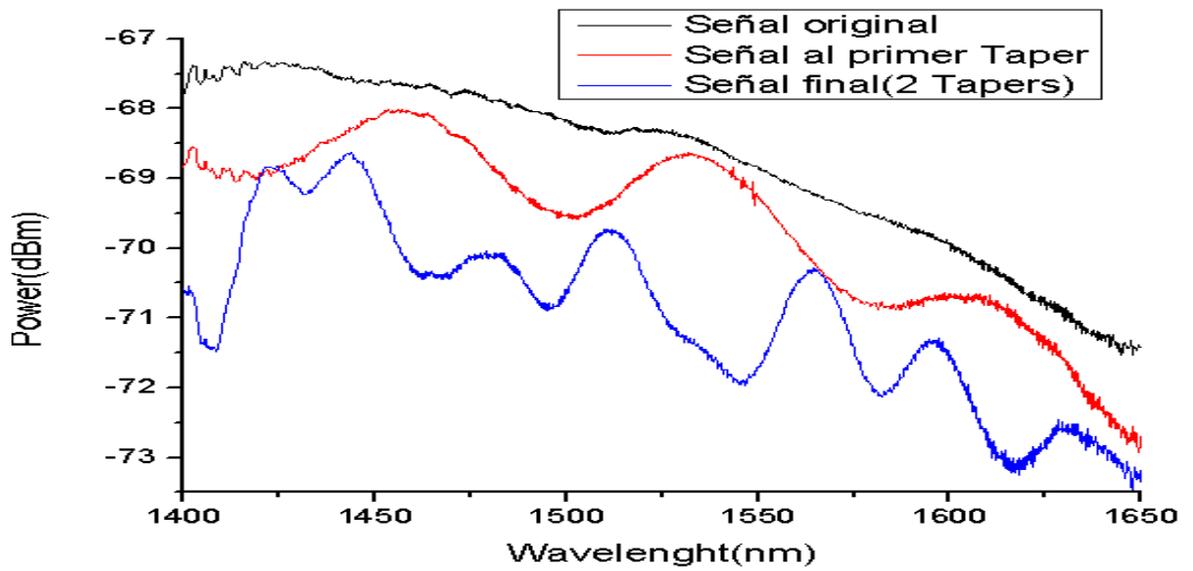


$\rho_i = 5.07 \mu\text{m}$   
 $Z = 3 \text{ mm}$

$\rho_w = 3.94 \mu\text{m}$   
 $L = 6 \text{ mm}$



Anexo 4: Pruebas 2 Tapers a 1.5 cm y a 2cm de separación respectivamente, con un diámetro de 20  $\mu\text{m}$ .



Anexo 5: Prueba de temperatura de fibra óptica con rejilla de Bragg

