

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

**“FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS
ESPECIALES”**

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN FÍSICA.

ELABORADO POR:

JESÚS FRANCISCO SOSA FLORES

ASESORA:

Dra. CARMEN ROSA EYZAGUIRRE GORVENIA

LIMA - PERÚ

2021

DEDICATORIA

A mi familia por ser el motivo fundamental en todo lo que hago, tanto en el aspecto académico como en mi vida personal, por ese apoyo y amor incondicional que perdura hasta la actualidad.

A mi hijo Nathan Nael que con su llegada se ha convertido en mi mayor motivación para seguir adelante en mis metas académicas y personales.

A cada una de las personas que me brindaron su apoyo y darme la fuerza necesaria para el termino de mi trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios, a mi familia por su gran apoyo y un agradecimiento especial a mí asesora de tesis Dra. Carmen Rosa Eyzaguirre Gorvenia por su apoyo, asesoría y consejos a lo largo de la elaboración de este trabajo. Agradezco también a la Universidad Nacional de Ingeniería por las facilidades de utilización de los equipos del laboratorio de Óptica Fotónica y a todas las personas y amistades que estuvieron conmigo todo este periodo.

Finalmente, quiero agradecer al programa de CIENCIA ACTIVA CONCYTEC por el financiamiento de esta tesis.

RESUMEN.

Se presenta la fabricación y caracterización de fibras ópticas (FO) adelgazadas (*tapers*), la aplicación de las mismas como acopladores biconicos y la implementación de un interferómetro de Mach-Zehnder utilizando los acopladores, mediante un equipo electro-mecánico optimizado utilizando la técnica de tracción.

Los parámetros necesarios para la fabricación tanto de los *tapers* como de los acopladores se determinaron experimentalmente después de una serie de intentos en obtener los más óptimos resultados; estos parámetros se introdujeron en un programa de simulación utilizando el programa Mathcad 14. Con el equipo electro-mecánico optimizado se elaboraron los acopladores, ingresando al programa de calentamiento los valores de la longitud de calentamiento (L_0), el diámetro de cintura de la FO (d_c) y el parámetro α quien controla el perfil del *taper*.

En el apartado 4 se presenta los resultados tanto de los *tapers* como de los acopladores biconicos obteniendo óptimos resultados los cuales se analizaron detalladamente para seguidamente realizar las comparaciones con la literatura obteniendo acopladores con razones de acoplamiento (52-48, 50-50, 51-49, 60-40, 80-20), y con pérdidas de inserción menores a los 3 dB. Los resultados obtenidos muestran que con el equipo electro-mecánico optimizado se pueden elaborar *tapers* con perfiles exponenciales, y con los diámetros de cintura que se ajustan a nuestros requerimientos al igual que los acopladores biconicos que se lograron alcanzar con pérdidas por inserción de hasta los 2.9 dB.

El interferómetro de Mach-Zehnder modificado se implementó utilizando uno de los acopladores el cual presenta una razón de acoplamiento de 50/50, con el propósito de observar los patrones que son capturados mediante una cámara de video conectado a un monitor. Después de una serie de intentos se logró obtener imágenes de interferencias con un buen número de franjas brillantes y oscuras bien resueltas.

ABSTRACT.

The manufacture and characterization of thinned optical fibers (FO) (tapers), their application as biconical couplers and the implementation of a Mach-Zehnder interferometer using the couplers, by means of an optimized electro-mechanical equipment using the technique of traction.

The parameters necessary for the manufacture of both the *tapers* and the couplers were determined experimentally after a series of attempts to obtain the best results; These parameters were entered in a simulation program using the Mathcad 14 program. With the optimized electro-mechanical equipment, the couplers were elaborated, entering the heating length values (L_0), the waist diameter of the FO (d_c) and the parameter α who controls the profile of the *taper*.

In section 4 the results of both the *tapers* and the biconical couplers are presented, obtaining optimal results, which were analyzed in detail to then make comparisons with the literature, obtaining couplers with coupling ratios (52-48, 50-50, 51- 49, 60-40, 80-20), and with insertion losses less than 3 dB. The results obtained show that with the optimized electro-mechanical equipment, tapers with exponential profiles can be elaborated, and with the waist diameters that adjust to our requirements, as well as the biconical couplers that were achieved with insertion losses of up to 2.9 dB.

The modified Mach-Zehnder interferometer was built using one of the couplers which has a coupling ratio of 50/50, in order to observe the patterns that are captured by a video camera connected to a monitor. After a series of attempts, it was possible to obtain images with a suitable number of optical interference fringes, also presenting a suitable number of pixels for each fringe.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE TABLAS	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Justificación.....	2
2. FUNDAMENTOS GENERALES.....	3
2.1 Fibra Óptica.....	3
2.1.1 Tipos de Fibras Ópticas.....	4
2.2 Atenuación en FO.....	5
2.3 Fundamentos de las Guías de Onda.....	6
2.4 Propagación de ondas de luz.....	7
2.5 Modos de Propagación.....	8
2.5.1 Modos de propagación en guías planas.....	9
2.5.2 Modos en FO.....	11
2.6 FO Adelgazadas.....	17
2.6.1 Parámetros fundamentales de los <i>tapers</i>	18

2.7	Técnicas de Fabricación.....	22
2.8	Acopladores de FO.....	23
2.9	Ecuación de modos acoplados.....	24
2.9.1	Deducción de las ecuaciones de modos acoplados para un acoplador....	24
2.10	Acoplador Codireccional.....	28
2.11	Diseño de acopladores de FO.....	29
2.12	Interferometría.....	30
2.13	Interferómetro de Mach-Zehnder.....	31
3.	PARTE EXPERIMENTAL.....	33
3.1	Sistema de Adelgazamiento.....	33
3.2	Fabricación de los <i>Tapers</i>	35
3.3	Fabricación de los acopladores de fibra óptica.....	38
3.4.	Implementación del Interferómetro de Mach-Zehnder modificado.....	39
4	RESULTADOS.....	40
4.1	Resultado de los <i>Tapers</i>	40
4.2	Resultado de los Acopladores.....	46
4.3	Resultados del Interferómetro de Mach-Zehnder modificado.....	55
5	CONCLUSIONES.....	57
	REFERENCIAS	58

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección transversal de una FO. [2]	3
Figura 2. Perfil del índice de refracción y transmisión de los rayos en una fibra de índice escalonado: a) multimodo; b) monomodo.[6]	5
Figura 3. Mecanismos de atenuación: a) esparcimiento, b) absorción y c) doblamientos. [5].....	6
Figura 4. Propagación de un haz dentro de una guía de onda. [8]	7
Figura 5. Modos transversales eléctricos (TE) y modos transversales magnéticos (TM). [12]	9
Figura 6. Modos <i>LP</i> y modos exactos. [2].....	16
Figura 7. Diagrama $b - V$ de modos <i>LP</i> para FO de índice abrupto. [11]	17
Figura 8. Esquema del perfil de un <i>taper</i> . [6].....	18
Figura 9. Perfil longitudinal de un <i>taper</i> . [24]	18
Figura 10. a) Fibra al tiempo $t=0$, es calentada una sección con longitud L_0 . b) La fibra al tiempo t durante el proceso de calentamiento. [5]	19
Figura 11. Perfiles de los <i>tapers</i> en función del parámetro α , a partir de una zona caliente variable y para los mismos valores de r_0 , L_0 y r_c . [26]	21
Figura 12. Técnica de adelgazamiento por tracción usando una fuente de calentamiento. [31]	23
Figura 13. Esquema de un acoplador de fibra óptica indicando las características empleadas para analizar el acoplamiento de luz entre ambas fibras ópticas. [34].....	23
Figura 14. Guías de onda direccionalmente acopladas. [44]	24
Figura 15. Coeficiente de acoplamiento cpq en la interfaz de 2 guías de onda.[44] ...	28
Figura 16. Acoplador fabricado mediante la técnica de tracción.[46].....	29

Figura 17. Parte superior, Interferencia constructiva. Parte inferior, Interferencia destructiva. [47]	31
Figura 18. Diagrama esquemático del interferómetro de Mach-Zehnder. [49].....	32
Figura 19. Primer sistema electro-mecánico.....	34
Figura 20. Nuevo sistema electro-mecánico optimizado.....	35
Figura 21. Diseño del interferómetro de Mach-Zahnder modificado, fabricado con el acoplador de razón de acoplamiento de 50/50.	39
Figura 22. Imagen tomada por la cámara del microscopio de los <i>tapers</i> fabricados con diámetro de cintura igual a 8, 10,15 y 20um observados de arriba hacia abajo respectivamente.	40
Figura 23. Relación de conicidad R respecto a la longitud de estirado x de los 10 primeros <i>tapers</i>	41
Figura 24. Perdidas de voltaje del <i>taper</i> n°1, con diámetro de cintura 20 <i>um</i>	43
Figura 25. Perdidas de voltaje del <i>taper</i> 2, con diámetro de cintura 15 <i>um</i>	44
Figura 26. Perdidas de voltaje del <i>taper</i> 3, con diámetro de cintura 20 <i>um</i>	45
Figura 27. <i>Tapers</i> fabricados con D_c (20 <i>um</i> – 15 <i>um</i>) en el laboratorio de óptica fotónica.	46
Figura 28. Potencia Normalizada vs N(Número de Datos) del acoplador n°1 con $D_c = 20um$	48
Figura 29. Potencia Normalizada vs N(Número de Datos) del acoplador n°2 con $D_c = 35um$	50
Figura 30. Potencia Normalizada vs N(Número de Datos) del acoplador n°3 con $D_c = 35um$	51
Figura 31. Acopladores fabricados con razón de acoplamiento (52/48, 50/50, 51/49) en el laboratorio de óptica fotónica.....	53

Figura 32. Trasmisión de potencia del acoplador de razón de acoplamiento (60/40). 55

Figura 33. Patrón obtenido con el Interferómetro con el acoplador de 50/50. 56

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros generales para la fabricación de los <i>tapers</i> y acopladores.....	37
Tabla 2. Parámetros de fabricación para los <i>tapers</i> 1, 2, 3, 4 y 5.	37
Tabla 3. Parámetros de fabricación para los <i>tapers</i> 6, 7, 8, 9 y 10.	37
Tabla 4. Parámetros de fabricación para los <i>tapers</i> 11, 12, 13, 14 y 15.	38
Tabla 5. Parámetros de fabricación para los <i>tapers</i> 16, 17, 18, 19 y 20.	38
Tabla 6. Datos de los <i>tapers</i> obtenidos experimentalmente con temperatura constante.	41
Tabla 7. Parámetros para la fabricación del <i>taper</i> n°1 con pérdidas del 5%.	42
Tabla 8. Parámetros para la fabricación del <i>taper</i> n°2 con pérdidas del 7%.	43
Tabla 9. Parámetros para la fabricación del <i>taper</i> n°3 con pérdidas del 23%.	44
Tabla 10. Parámetros para la fabricación del acoplador biconico n°1.	47
Tabla 11. Parámetros para la fabricación del acoplador biconico n° 2.	49
Tabla 12. Parámetros para la fabricación del acoplador biconico n°3.	50
Tabla 13. Parámetros para la fabricación del acoplador n°4.....	53
Tabla 14. Parámetros para la fabricación del acoplador n°5.....	54

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día las FO constituyen uno de los instrumentos centrales en el mundo de las telecomunicaciones. Las FO son finos hilos que han sido diseñados para el transporte de una gran cantidad de datos en forma de luz y cuyas aplicaciones son diversas aparte de las telecomunicaciones; ya que hoy en día se puede aplicar en medicina, sensores, etc.

Al pasar de los años, las técnicas de fabricación de las fibras han originado la existencia de una familia de dispositivos usados en la actualidad y cuya clave radica en cómo estos interaccionan con los campos de las ondas guiadas. De esta gran familia destaca las FO adelgazadas el cual mayormente tiene su aplicación principal en sensores ópticos.

Las FO adelgazadas comúnmente conocidas como *tapers* presentan dimensiones micrométricas y el principal modo de propagación de un haz de luz está confinado dentro de ellas. Existen otros *tapers* donde sus dimensiones son manométricas y donde el modo de propagación es evanescente entendiendo que se propaga predominantemente fuera, interactuando con el medio circundante logrando una modificación en la propagación del haz de luz dentro de los *tapers*.

Para la fabricación de los *tapers* existen varios métodos de los cuales en este trabajo se eligió la técnica de tracción de fibra. Se colaboró con la fabricación del sistema automatizado el cual consistía en una flama pequeña que se genera producto de la combustión del oxígeno y butano. Existen parámetros importantes que se toman en consideración para la fabricación de los *tapers* tal como la temperatura de la flama que oscila entre 847°C – 850°C, la velocidad del estirado, etc.

La fabricación de los *tapers* son la base para la manipulación de haces de luz, y para tal estas deben de ser caracterizadas con el fin de conocer su comportamiento antes durante y después de ser adelgazadas. Solo así teniendo *tapers* adecuados y precisos se puede dar inicio a la fabricación y caracterización de los acopladores biconicos.

1.1. Objetivos.

Objetivo General.

- Estudio y fabricación de FO adelgazadas (*tapers*), su aplicación como acopladores biconicos.

Objetivos Específicos.

- Optimización del sistema electro-mecánico de adelgazamiento de FO.
- Fabricación de los *tapers* con el sistema electro-mecánico optimizado.
- Caracterización de los *tapers*.
- Fabricación y caracterización de los acopladores biconicos.
- Implementación de un interferómetro de Mach-Zehnder modificado mediante acoplador biconico.

1.2. Justificación.

En la actualidad el campo de la investigación en el área de tecnologías basadas en los *tapers* se encuentra en crecimiento debido a sus diversas aplicaciones en distintas áreas. Al pasar de los años se han ido encontrando diversos métodos de fabricación de los *tapers*, y algunos de ellos pueden ser implementados con bajo costo, además de permitir la manipulación de ciertos parámetros que están involucrados en la elaboración de los *tapers* según nuestro requerimiento. Sus diversas aplicaciones tales como los sensores ópticos basados en fibras presentan importantes ventajas cuando se desean determinar propiedades físicas o químicas. Las FO permiten la posibilidad de control a distancia de lugares poco accesibles físicamente y se puede integrar en sistemas más complejos. Estos sensores ópticos son muy adecuados debido a que proporcionan una alta sensibilidad y una respuesta prácticamente inmediata, son inmunes a interferencias electromagnéticas. Los acopladores biconicos que son resultado de la fabricación de los *tapers* son muy utilizados hoy en día para diversas aplicaciones como lo es las telecomunicaciones.

2. FUNDAMENTOS GENERALES.

2.1 Fibra Óptica.

La FO es un filamento delgado, largo y flexible cuyo diámetro oscila en el orden de las micras. Estos se constituyen por dos cilindros concéntricos cuyos índices de refracción son distintos formando una estructura monolítica; el cilindro interno lleva por nombre núcleo y comúnmente es de dióxido de silicio (SiO_2) por donde viajan los haces de luz. El cilindro exterior conocido como revestimiento, es el que rodea al núcleo y refleja la luz que incide en él; esto permite que en el interior del núcleo el índice de refracción sea mayor siempre que en el revestimiento [1]. En la siguiente figura se muestra la sección transversal de una FO.

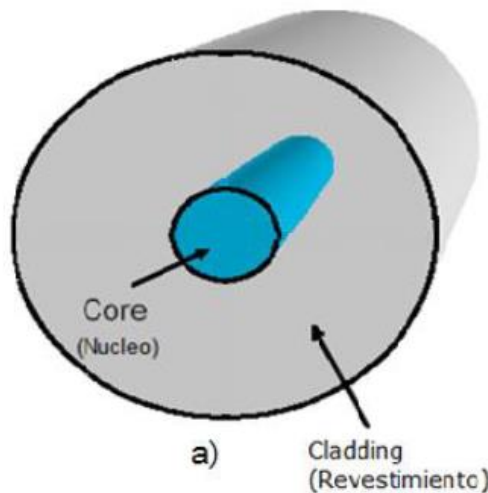


Figura 1. Sección transversal de una FO. [2]

Las FO presentan parámetros de los cuales uno de los más importantes es conocido como cono de aceptación o apertura numérica (NA), el cual determina la cantidad máxima de luz que se propaga por el núcleo. Se define de la siguiente manera:

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.1)$$

Dónde:

n_{co} → Índice del núcleo.

n_{cl} → Índice de recubrimiento.

Otro de los parámetros se conoce como frecuencia normalizada V , y es la encargada de identificar el régimen modal de operaciones de las FO. Se define como:

$$V = akNA \quad (2.2)$$

Dónde:

$a \rightarrow$ Radio de la fibra.

$NA \rightarrow$ Apertura numérica.

$k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow$ Número de onda.

Si se cumple que $V < 2.405$, la FO opera en régimen monomodo y si $V > 2.405$, entonces opera en régimen multimodal. [3][4]

2.1.1 Tipos de Fibras Ópticas.

Las guías de onda se pueden clasificar, en primera instancia, por el perfil de índice de refracción del material del núcleo (índice escalonado o índice gradual), y, por otro lado, por la capacidad de propagación del modelo (monomodo y multimodo). [5]

FO de salto de índice, son fibras en las que su núcleo tiene el índice de refracción constante.

FO de índice gradual, en este tipo de fibras el índice de refracción del núcleo varia aumentando gradualmente desde el eje de la fibra hacia el revestimiento.

FO Monomodo (*Single mode, SM*).

Las FO monomodo presentan un núcleo pequeño, al igual que un diámetro de solo unos micrómetros y pueden guiar un solo modo que típicamente tiene un perfil Gaussiano. Las FO monomodo permiten la transmisión de una alta capacidad de información, esto se debe a que dichas fibras pueden mantener la forma de cada pulso de luz sobre distancias largas y por lo tanto no presenta dispersión de múltiples modos. Además, presentan una baja atenuación en comparación de las fibras multimodo, debido a esto pueden transmitir más información por unidad de tiempo. [5]

FO Multimodo (*Multimode, MM*).

Las FO multimodo presentan un núcleo de diámetro mayor a los $50 \mu\text{m}$ y/o el valor de sus índices del núcleo y revestimiento presentan una mayor diferencia, por ende, en ambos casos aceptan múltiples modos de propagación con distribuciones de intensidad distintos. Para la existencia de una mayor diferencia entre los valores de índice del núcleo y revestimiento, el perfil espacial de la luz emergente del núcleo de la fibra dependerá de las condiciones de acoplamiento haz-fibra, lo cual determina la distribución de energía entre los modos espaciales. [5]

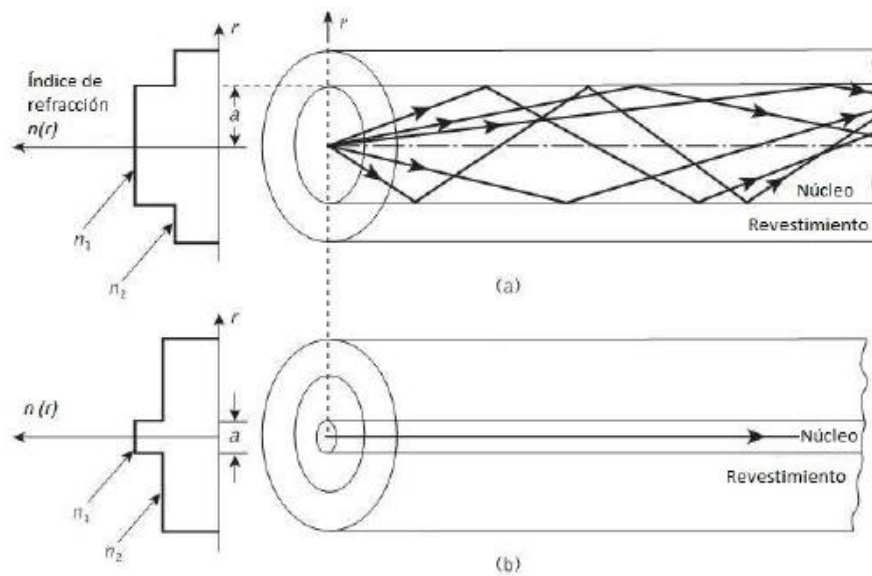


Figura 2. Perfil del índice de refracción y transmisión de los rayos en una fibra de índice escalonado: a) multimodo; b) monomodo.[6]

2.2 Atenuación en FO.

La atenuación es la encargada de medir la pérdida de potencia óptica de la luz en su trayectoria interna por una FO y el cual se mide en decibeles (dB). Se expresa matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (2.3)$$

Dónde:

$P_1 \rightarrow$ potencia de entrada.

$P_2 \rightarrow$ potencia de salida.

La atenuación se manifiesta por diversos factores que pueden ser de tipo intrínsecos y extrínsecos. Dos factores intrínsecos son el esparcimiento (*scattering*) y la absorción, y los factores extrínsecos suelen ser torceduras, efectos ambientales o doblamientos físicos. Debido a estos factores la atenuación se expresa mediante la ecuación:

$$\alpha = \alpha_{scattering} + \alpha_{absorción} + \alpha_{doblamiento} \quad (2.4)$$

La atenuación en una FO se determina primeramente por la longitud de la fibra y la longitud de la onda de luz que viaja a través de ella. [5]

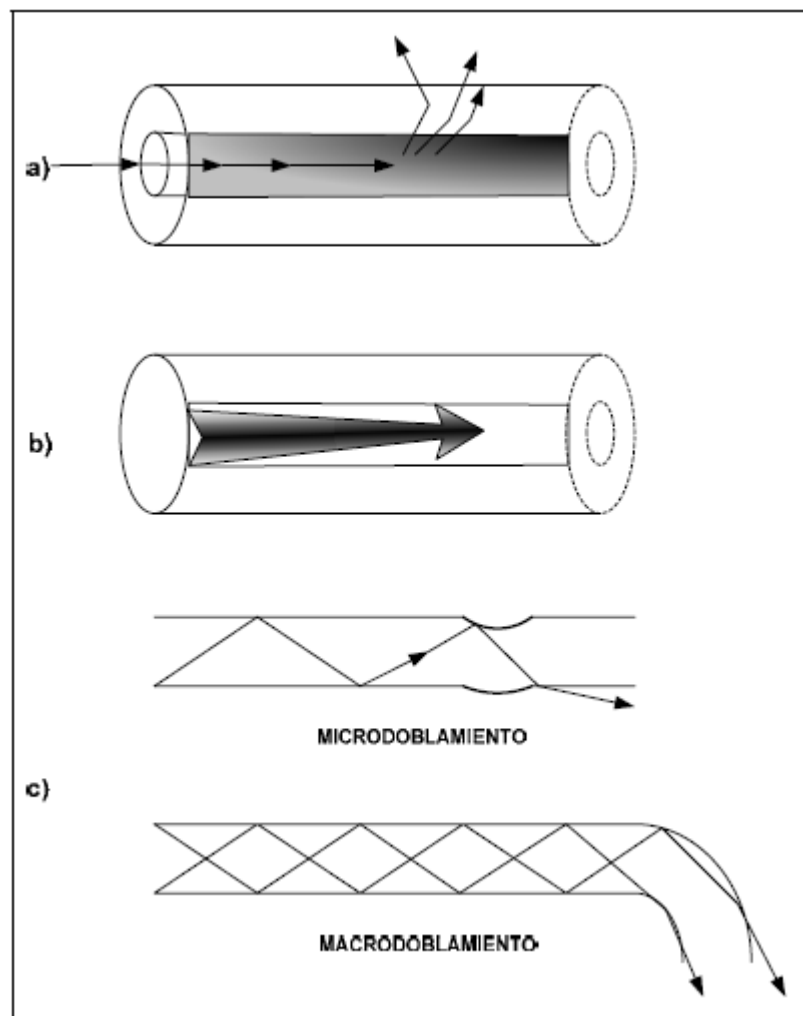


Figura 3. Mecanismos de atenuación: a) esparcimiento, b) absorción y c) doblamientos. [5]

2.3 Fundamentos de las Guías de Onda.

La guía de onda óptica es una estructura cuya finalidad es que la luz viaje a través de un camino específico deseado. El mecanismo físico que hace que la luz viaje en una dirección

especifica es la Reflexión Total Interna, el cual se produce cuando el índice de refracción del medio que rodea la trayectoria de la onda es menor al medio en el cual se propaga la onda [7] [8]. Se observa dicha propagación en la siguiente figura.

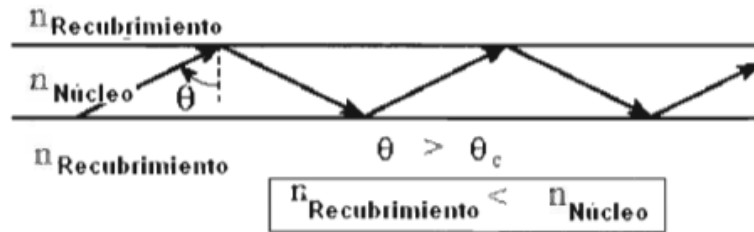


Figura 4. Propagación de un haz dentro de una guía de onda. [8]

Las guías de onda pueden propagar, en teoría, un número infinito de ondas electromagnéticas de distintos tipos. Cada modo presenta una frecuencia crítica, de modo tal que por debajo de esta no se propagara señal alguna. Para un tamaño particular de guía de onda, el modo de propagación correspondiente a la menor frecuencia de corte se denomina modo principal. Este será el único modo propagado si la frecuencia es mayor a la primera frecuencia de corte, pero menor a la frecuencia de corte del segundo modo. [8]

La geometría de las guías de onda pueden ser planas (*slab, strip*) o de forma cilíndrica, siendo esta última la más utilizada en las FO. [9]

2.4 Propagación de ondas de luz.

La propagación de un haz de luz por una FO se puede estudiar como un caso particular de interacción de un campo electromagnético con un medio, por lo cual se utilizará las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \vec{\rho} \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.8)$$

Dónde:

\vec{E} y \vec{H} → Intensidad de campo eléctrico y magnético respectivamente.

\vec{D} y \vec{B} → Desplazamiento eléctrico y la inducción magnética respectivamente.

\vec{J} → Densidad de corriente.

$\vec{\rho}$ → Densidad de carga.

Las FO son medios dieléctricos, por ende, no existen cargas libres, de lo cual se puede deducir lo siguiente:

$$\vec{J} = 0 \quad , \quad \vec{\rho} = 0 \quad (2.9)$$

Donde \vec{E} y \vec{H} para ondas planas están representados por:

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y)e^{i[\omega t - \beta z]} \quad (2.10)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y)e^{i[\omega t - \beta z]} \quad (2.11)$$

El modelo usado para analizar matemáticamente la propagación de la radiación electromagnética dentro de la guía óptica considera ondas planas monocromáticas. En tal sentido utilizando las ecuaciones de Maxwell y operaciones matemáticas se llega a la ecuación diferencial para una onda:

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

Similarmente se cumple para el vector del campo magnético \vec{H} . [10]

2.5 Modos de Propagación.

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse mediante guías de diferentes geometrías, las más comunes son las guías planas y las guías cilíndricas (FO). Y su propagación se puede dar de diferentes modos. La cantidad de modos de propagación depende exclusivamente de los índices de refracción tanto del núcleo como del revestimiento, del radio del núcleo y de la longitud de onda utilizada. [4]

2.5.1 Modos de propagación en guías planas.

Una guía plana consiste en un plano dieléctrico con índices de refracción distinto tanto para el núcleo como para el revestimiento. Para un mejor modelo de propagación óptica, es útil considerar la interferencia causada por las componentes de los campos eléctrico y magnético de la onda dentro del dieléctrico. [6]

Los modos obtenidos en una guía de onda que se propaga mediante el eje z confinada solamente en la dimensión x , presenta una componente \vec{E}_z o \vec{H}_z nula, por ende son ondas transversales eléctricos (TE) u ondas transversales magnéticos (TM) [11], como se muestra a continuación en la figura 5.

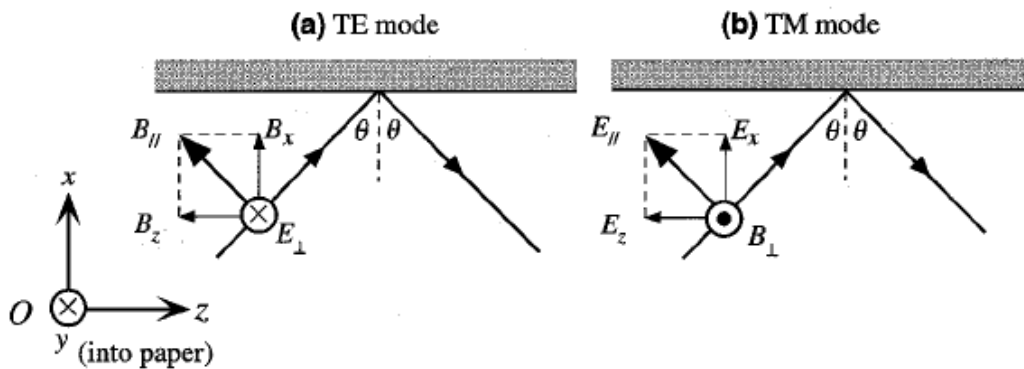


Figura 5. Modos transversales eléctricos (TE) y modos transversales magnéticos (TM). [12]

Haciendo uso de la teoría ondulatoria, la solución general para los campos en un modo guiado en una guía plana con dirección en el eje z es de la forma:

$$\vec{E} = \vec{E}(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (2.13)$$

$$\vec{H} = \vec{H}(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (2.14)$$

Donde β es la constante de propagación de la onda, su valor se logra obtener resolviendo la ecuación de onda con las condiciones de contorno. Para el caso de la guía plana donde el índice de refracción varía a lo largo del eje x , y , si no varían los parámetros del material en la dirección y , se puede suponer que $\partial/\partial y = 0$; entonces las distintas componentes de los campos eléctrico y magnético tienen las siguientes expresiones:

$$\vec{H}_x = \vec{H}_{0x}(x, y)e^{i[\omega t - \beta z]} \quad (2.15)$$

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{0x}(x, y)e^{i[\omega t - \beta z]} \quad (2.16)$$

Similarmente estas expresiones se dan para los demás componentes.

Se sustituye las expresiones de \vec{E} y \vec{H} en las ecuaciones de Maxwell para un medio isotrópico:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \cdot \partial \vec{H} / \partial t \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \cdot \partial \vec{E} / \partial t \quad (2.18)$$

El cálculo se obtiene si se introduce las dos polarizaciones básicas ortogonales (TE y TM) obteniendo relaciones entre $\vec{E}_y, \vec{H}_x, \vec{H}_z$; este primer conjunto corresponde a modos TE en donde el campo eléctrico es puramente transversal al vector de propagación ($\vec{E}_z = 0$) y un conjunto independiente de relaciones entre, \vec{E}_x, \vec{E}_z y \vec{H}_y ; este segundo conjunto corresponde a modos TM en donde el campo magnético solo tiene componente transversal ($\vec{H}_z = 0$). Cualquier otra dirección del campo eléctrico podrá descomponerse en función de dos componentes, una paralela (TM) y otra transversal (TE), llegando a la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \left(\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial z} \right) \hat{i} + \left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x} \right) \hat{j} + \left(\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial y} \right) \hat{k} = -\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial z} \hat{i} + \\ &\left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x} \right) \hat{j} + \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} \hat{k} = i\varepsilon\omega \vec{E}_x \hat{i} + i\varepsilon\omega \vec{E}_y \hat{j} + i\varepsilon\omega \vec{E}_z \hat{k} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Análogamente se realiza el mismo procedimiento para \vec{E} , quedando:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= \left(\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} \right) \hat{i} + \left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} \right) \hat{j} + \left(\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} \right) \hat{k} = -\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} \hat{i} + \\ &\left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} \right) \hat{j} + \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} \hat{k} = -i\mu\omega \vec{H}_x \hat{i} - i\mu\omega \vec{H}_y \hat{j} - i\mu\omega \vec{H}_z \hat{k} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Las relaciones para los modos transversales son los siguientes:

Modos TE ($\vec{E}_z = 0$) involucran a \vec{E}_y , \vec{H}_x y \vec{H}_z :

$$\begin{aligned}\beta \vec{E}_y &= -\mu\omega \vec{H}_x \\ -i\beta \vec{H}_x - \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x} &= i\varepsilon\omega \vec{E}_y\end{aligned}\quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} = -i\mu\omega \vec{H}_z$$

Modos TM ($\vec{H}_z = 0$) involucran a \vec{E}_x , \vec{E}_z y \vec{H}_y :

$$\begin{aligned}\beta \vec{H}_y &= \varepsilon\omega \vec{E}_x \\ i\beta \vec{E}_x + \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} &= i\mu\omega \vec{H}_y\end{aligned}\quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} = i\varepsilon\omega \vec{E}_z$$

En una guía plana se tiene separaciones de modos TE y TM. Si no hay una variación de los parámetros del material a lo largo del eje x , entonces se cumple:

$$\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} = 0 \rightarrow \vec{H}_z = 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} = 0 \rightarrow \vec{E}_z = 0 \quad (2.24)$$

Cuando estos casos se presentan no existe componente axial de los campos, por consiguiente estas ondas toman el nombre de transversal electromagnética (TEM) [12].

2.5.2 Modos en FO.

A fin de comprender la propagación de la luz en una FO, se considera una onda plana monocromática de frecuencia ω viajando a lo largo de la dirección de propagación z referida a un sistema de coordenadas cilíndricas. [13]

Partimos con sustituir el sistema normal con el sistema de coordenadas cilíndricas (r, φ, z) entonces tenemos: [11]

$$\vec{E} = \vec{E}_0(r, \varphi) \exp[-j(\beta z - \omega t)] \quad (2.25)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(r, \varphi) \exp[-j(\beta z - \omega t)] \quad (2.26)$$

Donde β es la constante de propagación, es decir, la componente z del vector de propagación k .

Ahora aplicando las ecuaciones de Maxwell en coordenadas cilíndricas y separando las componentes, tenemos para \vec{E} .

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{r} u_r & u_\varphi & \frac{1}{r} u_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \vec{E}_r & r \vec{E}_\varphi & \vec{E}_z \end{bmatrix} = -u \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \vec{H}_r \\ \vec{H}_\varphi \\ \vec{H}_z \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Desarrollando los términos $\partial/\partial z$ y $\partial/\partial t$ se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial z} \vec{E} = -j\beta \vec{E} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{E} = j\omega \vec{E} \quad (2.29)$$

Reemplazando se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial \varphi} + jr\beta \vec{E}_\varphi \right) = -j\omega \mu \vec{H}_r \quad (2.30a)$$

$$-\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} - j\beta \vec{E}_r = -j\omega \mu \vec{H}_\varphi \quad (2.30b)$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r \vec{E}_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial \vec{E}_r}{\partial \varphi} \right) = -j\omega \mu \vec{H}_z \quad (2.30c)$$

El mismo procedimiento para el cálculo de las ecuaciones del \vec{H} obteniendo lo siguiente:

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial \varphi} + jr\beta \vec{H}_\varphi \right) = -j\omega \epsilon \vec{E}_r \quad (2.31a)$$

$$-\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial r} - j\beta \vec{H}_r = -j\omega\mu \vec{E}_\varphi \quad (2.31b)$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r\vec{H}_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial \vec{H}_r}{\partial \varphi} \right) = -j\omega\mu \vec{E}_z \quad (2.31c)$$

Nos interesa que las componentes transversales se denoten en función de \vec{E}_z y \vec{H}_z . Estas son las dos componentes que eventualmente dan cuenta de la propagación. Así, se puede eliminar \vec{E}_φ entre (2.30a) y (2.31b), permitiendo que la otra componente transversal (\vec{H}_r) se exprese en función de \vec{E}_z y \vec{H}_z . Realizando estas operaciones de forma sistemática se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \vec{E}_r \\ \vec{E}_\varphi \\ \vec{H}_r \\ \vec{H}_\varphi \end{pmatrix} = -\frac{j}{q^2} \left[\beta \begin{pmatrix} \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial \varphi} \\ r \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial \varphi} \\ r \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} \end{pmatrix} + \omega \begin{pmatrix} \mu \frac{\partial \vec{H}_z}{r \frac{\partial \varphi}} \\ -\mu \frac{\partial r}{\partial \vec{H}_z} \\ \epsilon \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} \\ -\frac{r \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{E}_z}}{\epsilon} \end{pmatrix} \right] \quad (2.32)$$

Siendo $q^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2 = k^2 - \beta^2$.

Sustituyendo las dos ecuaciones inferiores en (2.31c) se obtiene la correspondiente ecuación de onda en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial \varphi^2} + q^2 \vec{E}_z = 0 \quad (2.33)$$

y con las otras dos se obtiene la equivalente para \vec{H}_z [10]:

$$\frac{\partial^2 \vec{H}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vec{H}_z}{\partial \varphi^2} + q^2 \vec{H}_z = 0 \quad (2.34)$$

Se observa que las ecuaciones (2.33) y (2.34), las componentes \vec{E}_z y \vec{H}_z aparecen de forma independiente, mientras que las componentes longitudinales de \vec{E} y \vec{H} están desacopladas, y se puede escoger cualquier valor arbitrario de una sin que la otra se afecte. [11]

El proceso de resolución algebraica es largo, quedando las expresiones para el \vec{E} y \vec{H} dentro del núcleo y revestimiento de la siguiente forma:

Dentro del núcleo:

$$\vec{E}_{Z1} = AJ_v(ur)e^{jv\theta-j\beta z+j\omega t} \quad (2.35)$$

$$\vec{H}_{Z1} = BJ_v(ur)e^{jv\theta-j\beta z+j\omega t} \quad (2.36)$$

Dentro del revestimiento:

$$\vec{E}_{Z2} = CK_v(wr)e^{jv\theta-j\beta z+j\omega t} \quad (2.37)$$

$$\vec{H}_{Z2} = DK_v(wr)e^{jv\theta-j\beta z+j\omega t} \quad (2.38)$$

De las ecuaciones anteriores A, B, C y D son constantes arbitrarias y sus valores pueden ser determinados haciendo la sustitución de las condiciones de fronteras adecuadas, esto resulta en la ecuación de eigenvalor.

La solución se presenta por el método de separación de variables donde la solución general se da por medio de las funciones de Bessel [14]. Por lo tanto se presenta la ecuación de valores propios, cuya solución determina la constante de propagación β .

$$\left[\frac{J_l(U)}{UJ_l(U)} + \frac{K_l(W)}{WK_l(W)} \right] \left[\frac{n_{co}^2 J_l(U)}{UJ_l(U)} + \frac{n_{cl}^2 K_l(W)}{WK_l(W)} \right] = l^2 \left[\left(\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right) \right]^2 \left(\frac{\beta}{k_0} \right)^2 \quad (2.39)$$

Donde J_l son las funciones de Bessel de primera clase y K_l representan las funciones modificadas de Bessel de segunda clase. El parámetro l es el numero modal azimutal. [14]

Resolviendo la ecuación (2.39) para $\frac{J_l(U)}{UJ_l(U)}$ se tiene:

$$\frac{J_l(U)}{UJ_l(U)} = - \left(\frac{n_{co}^2 + n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \right) \frac{K_l(W)}{WK_l(W)} \pm \left[\left(\frac{n_{co}^2 + n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \right)^2 + \left(\frac{K_l(W)}{WK_l(W)} \right)^2 + \frac{l^2}{n_{co}^2} \left(\frac{\beta}{k_0} \right)^2 \left(\frac{1}{W^2} + \frac{1}{U^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

Se observa dos soluciones, los cuales son nombrados como modos híbridos EH y HE .

Usando las relaciones de recurrencia para las funciones de Bessel:

$$EH: \quad \frac{J_{l+1}(U)}{UJ_l(U)} = \left(\frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \right) \frac{K_l(W)}{WK_l(W)} + \frac{1}{U^2} - R \quad (2.41)$$

$$HE: \quad \frac{J_{l-1}(U)}{UJ_l(U)} = - \left(\frac{n_{co}^2 + n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \right) \frac{K_l(W)}{WK_l(W)} + \frac{1}{U^2} - R \quad (2.42)$$

Se denota R como:

$$R = \left(\frac{n_{co}^2 + n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \right)^2 \left[\frac{K_l(W)}{WK_l(W)} \right]^2 + \left(\frac{l\beta}{n_{co}k_0} \right)^2 \left(\frac{1}{W^2} + \frac{1}{U^2} \right) \quad (2.43)$$

Para $l = 0$ son análogos al modo TE y TM en las guías planas de la siguiente forma:

$$TE: \quad \frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} = - \frac{K_1(W)}{WK_0(W)} \quad (2.44)$$

$$TM: \quad \frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} = - \frac{n_{cl}^2}{n_{co}^2} \frac{K_1(W)}{WK_0(W)} \quad (2.45)$$

Estos serán denotados mediante TE_{0m} y TM_{0m} , donde $l = 0$ pertenece al primer subíndice y $m = 1, 2, 3, \dots$ corresponde al segundo e indica la raíz de orden m al resolver las ecuaciones (2.44) y (2.45).

Los parámetros U y W que corresponden a los eigenvalores del núcleo y revestimiento respectivamente, tienen la forma:

$$U = r_{co} \sqrt{k_0^2 n_{co}^2 - \beta^2} \quad W = r_{co} \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_{cl}^2} \quad (2.46)$$

Donde $\beta = 2\pi n_{eff}/\lambda$ es la constante de propagación modal, n_{eff} lleva por nombre índice de refracción efectivo, el cual varía en el rango $n_{cl} < n_{eff} < n_{co}$. La constante de propagación normalizada b es de la forma: [2]

$$b = 1 - \frac{U^2}{V^2} = \frac{\beta^2 - k_0^2 n_{cl}^2}{n_{co}^2 k_0^2 - n_{cl}^2 k_0^2} = \frac{n_{eff} - n_{cl}}{n_{co} - n_{cl}} \quad (2.47)$$

La solución de la ecuación (2.36), corresponde a formas o modos exactos de la distribución de campo electromagnéticos:

- ✓ Modos Transversal Eléctrico TE_{0m}
- ✓ Modos Transversal Magnéticos TM_{0m}

- ✓ Modos Híbridos Magneto-Eléctricos HE_{qm}
- ✓ Modos Híbridos Electro-Magnéticos EH_{qm}

La ecuación del eigenvalor se puede simplificar debido a que la diferencia entre n_{co} y n_{cl} es pequeño. Por ende, la ecuación simplificada es:

$$U \frac{J_1(U)}{J_0(U)} = \omega \frac{k_1(\omega)}{k_0(\omega)} \quad (2.48)$$

Los modos aproximados que resultan de la resolución de esta ecuación son conocidos como modos polarizados linealmente (LP o LP_{qm}).

Modos aproximados	Modos exactos
LP_{01}	HE_{11}
LP_{11}	$TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}$
LP_{21}	EH_{11}, HE_{31}
LP_{02}	HE_{12}
LP_{31}	EH_{21}, HE_{41}
LP_{12}	$TE_{02}, TM_{02}, HE_{22}$

Figura 6. Modos LP y modos exactos. [2]

Se muestra a continuación b para un numero de modos LP como función de V . Esta grafica es muy importante porque permite saber mediante el comportamiento de la guía de onda en función de cambios de longitud de onda, diámetro del núcleo y la apertura numérica.

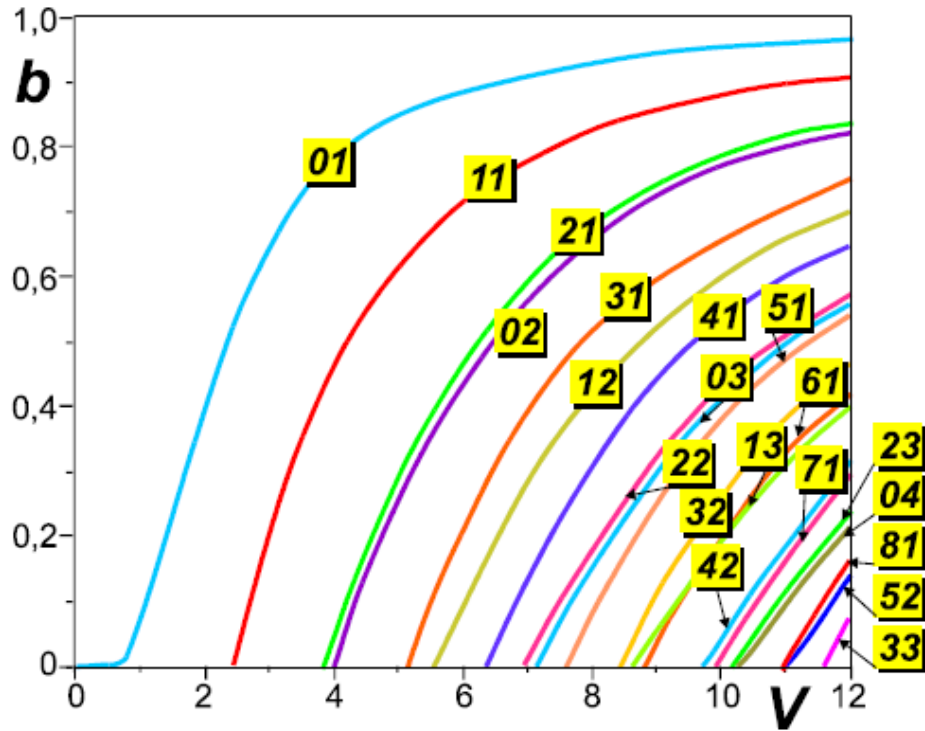


Figura 7. Diagrama $b - V$ de modos LP para FO de índice abrupto. [11]

La suma de los cuadrados de estos eigenvalores también definen el parámetro de frecuencia normalizada V anteriormente definida, de la siguiente manera: [11]

$$V = (U^2 + W^2)^{1/2} \quad (2.49)$$

2.6 FO Adelgazadas.

La FO estrechada o conocida como *Taper* se estudia por más de dos décadas en el área de la óptica aplicada, siendo sus principales aplicaciones: acopladores, multiplexores en longitud de onda, concentradores de haz, dispositivos acusto-ópticos o sensores [15]–[19]. Los *tapers* no son más que la modificación del radio en cierta longitud de la FO [20], por lo que permiten una mayor concentración de haces de luz [6], [21], [22]. El *taper* puede darse a entender como una estructura de guiado compuesta por cinco regiones diferentes, los cuales se muestran a continuación en la figura 8:

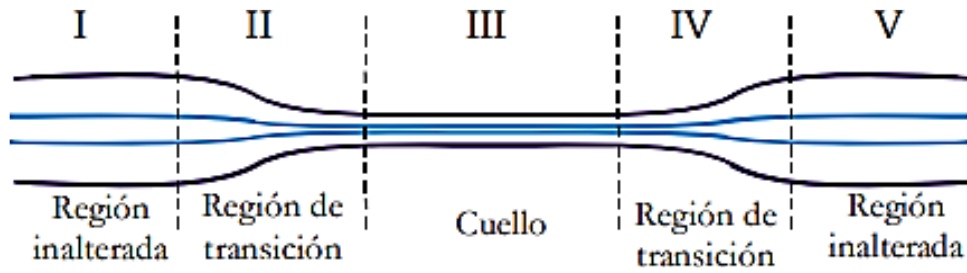


Figura 8. Esquema del perfil de un *taper*. [6]

La descripción de las regiones I y V corresponden a la fibra que ha permanecido inalterada, las regiones II y IV son zonas de transición de diámetro decreciente y creciente, normalmente con perfil de forma exponencial. La región III, cuya zona es la más estrecha, lleva por nombre cuello o cintura. [6]

2.6.1 Parámetros fundamentales de los *tapers*.

El modelo teórico utilizado para el ajuste de los parámetros de los *tapers* es el propuesto por Birks y Li, el cual menciona que la sección de la fibra adelgazada se calienta a una temperatura constante y presenta siempre una forma cilíndrica [6], y es la generalización de otros modelos anteriores al caso en que la longitud de la región de calentamiento varia. [23]

Para una longitud L_0 el cual es la región que se calienta uniformemente y se estira, dejando las regiones restantes frías y solidas fuera de este calentamiento uniforme, y mostrándose los parámetros en el siguiente *taper* de la figura 9.

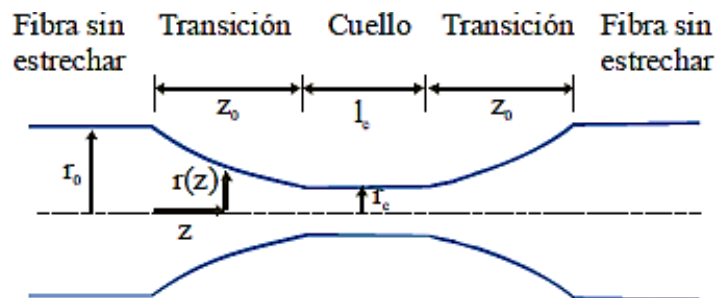


Figura 9. Perfil longitudinal de un taper. [24]

Se supondrá que el taper es simétrico, por ende, las dos zonas de transición son idénticas. De la figura r_0 corresponde al radio inicial de la fibra, y la longitud del cuello del taper es l_c con radio r_c . Las zonas de transición presentan una longitud z_0 y el perfil es descrito por una función radial decreciente $r(z)$, donde z representa la coordenada longitudinal. La

distancia neta sobre la cual se hará el estrechamiento será x , mientras que el estiramiento final del taper estará representado por x_0 .

La longitud de la cintura del taper a un tiempo t será la longitud de la zona caliente a ese mismo tiempo. Entonces se cumple:

$$l_c(t) = L(t) \quad (2.50)$$

La siguiente ecuación diferencial relaciona la variación del radio del cuello r_c con la longitud x .

$$\frac{dr_c}{dx} = -\frac{r_c}{2L} \quad (2.51)$$

Donde L puede variar como función de x , y este a su vez incrementa en función del tiempo t . Realizando una comparación de la longitud total PQ del taper con la distancia inicial PQ a un tiempo $t = 0$ de la figura 10, se obtiene:

$$2z_0 + L = x + L_0 \quad (2.52)$$

Donde L es función de x y L_0 es el valor inicial a $x = 0$. Haciendo $z_0 = z$ se tiene:

$$2z = x + L_0 - L \quad (2.53)$$

Donde x es específicamente la extensión a la cual el punto z fue sacado de la zona caliente.

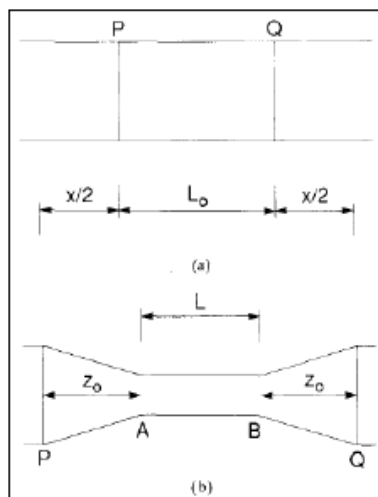


Figura 10. a) Fibra al tiempo $t=0$, es calentada una sección con longitud L_0 . b) La fibra al tiempo t durante el proceso de calentamiento.[5]

La variación del radio de la cintura en función de x se obtiene integrando la ecuación (2.51) con la condición inicial $r_c(0) = r_0$.

$$\int_{r_0}^{r_c} \frac{dr'_c}{r'_c} = -\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx'}{L(x')} \quad (2.54)$$

Obteniendo una expresión general:

$$r_c(x) = r_0 e^{\left[-\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx'}{L(x')}\right]} \quad (2.55)$$

Por la ecuación (2.53), la longitud de la zona de transición z como función de x es:

$$z(x) = \frac{1}{2} [x + L_0 - L(x)] \quad (2.56)$$

La función de perfil del taper se encuentra sustituyendo $x(r)$ en la ecuación (2.55) para $r_c(x)$.

$$r(z) = r_c(x(z)) \quad (2.57)$$

Para la situación particular donde se considera una zona de calentamiento constante, $L(x) = L_0$ por lo que $l_c = L_0$, entonces la ecuación (2.55) genera:

$$r_c(x) = r_0 \cdot e^{[-x/2L_0]} \quad (2.58)$$

Con el radio del cuello final como $r_w(x_0)$, la ecuación (2.56) resulta:

$$z(x) = x/2 \quad (2.59)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.58) la función del perfil del taper como función de z esta dado por:

$$r(z) = r_0 \cdot e^{[-z/L_0]} \quad (2.60)$$

Se observa que el perfil del taper decae exponencialmente en la zona de transición, conservando un radio de cuello uniforme. [24]

Para relacionar el radio de la cintura final con el radio inicial de la fibra, se define el parámetro R llamado relación de conicidad. [25]

$$R = \frac{r_c}{r_0} \quad (2.61)$$

Si la longitud de la zona caliente varía linealmente como:

$$L(x) = L_0 + \alpha \cdot x \quad (2.62)$$

Donde α es una constante que determina la variación de la zona caliente y estiramiento del *taper* y que debe cumplir $\alpha \leq 1$. La variación del radio del cuello se describe ahora:

$$r_c(x) = r_0 \left[1 + \frac{\alpha x}{L_0} \right]^{-1/2\alpha} \quad (2.63)$$

y su longitud como:

$$l_c = L_0 + \alpha \cdot x_0 \quad (2.64)$$

Las regiones de transición del *taper* son ahora:

$$r(z) = r_0 \left[1 + \frac{2\alpha z}{(1-\alpha)L_0} \right]^{-1/2\alpha} \quad (2.65)$$

Si tenemos que $\alpha \rightarrow 0$, se obtiene el perfil exponencial que muestra la ecuación (2.60). [24]

A continuación se muestra algunos de los diferentes perfiles de los *tapers* en función del valor del parámetro α para unos valores dados de r_0 , L_0 y un radio de cuello de valor $r_c = r_0/4$.

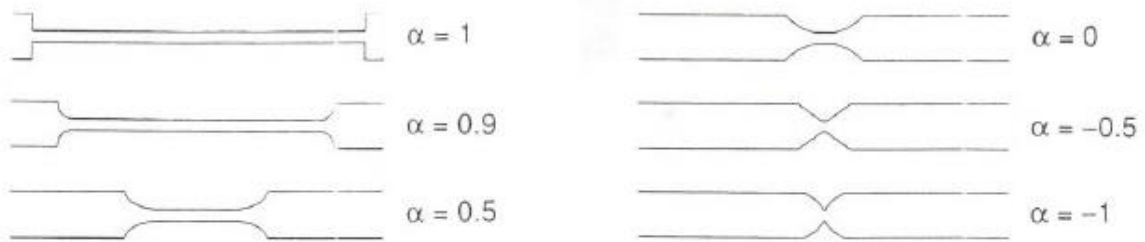


Figura 11. Perfiles de los *tapers* en función del parámetro α , a partir de una zona caliente variable y para los mismos valores de r_0 , L_0 y r_c . [26]

2.7 Técnicas de Fabricación.

Actualmente existen varias técnicas para la fabricación de los *tapers*, esto con la finalidad de poder conseguir FO con buenas propiedades físicas. A continuación, se detalla cada uno de las técnicas.

- Ablación por láser: Se elimina material de una superficie sólida o líquida por irradiación de un haz de láser continuo de alta intensidad. [27]
- Técnicas de vapor-liquido-solido (*bottom-up*): Esta técnica tiene su base en el crecimiento de un cristal, como nano-cables, a través de la absorción directa de una fase de gas a una superficie sólida introduciendo una fase catalítica de aleación líquida que acelera la absorción del vapor a niveles de sobresaturación. [28]
- Tracción de una fibra (*top-down*): Esta técnica se basa en la reducción de una parte del volumen de la fibra, esto se logra usando un esfuerzo interno sometiendo el material a la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto y que tienden a estirarlo. Además, introduciendo una fuente de calor se logra la variación de la fabricación de los *tapers*, ya que esta introducción proporciona un fácil control y posibilidad de proveer una alta temperatura, suficiente para conseguir mayor viscosidad y estirar un material como la FO. [29]
- Ataque químico: Esta técnica elimina la zona de revestimiento con una solución ácida de alta concentración por un tiempo, y luego se diluye la solución para el control del diámetro de cintura, que además depende de la temperatura, humedad y el dopaje de fibra de vidrio. La característica óptica en este procedimiento varía ya que la estructura final tiende a tener una sola interfaz (núcleo-aire). [30]

A continuación, se muestra la técnica de fabricación que se utilizó para la elaboración de los respectivos *tapers* como de los acopladores biconicos.

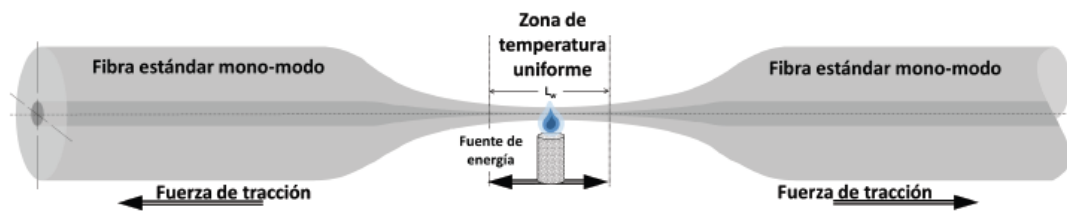


Figura 12. Técnica de adelgazamiento por tracción usando una fuente de calentamiento. [31]

2.8 Acopladores de FO.

Los primeros acopladores biconicos de FO surgieron en los años de 1990 [32], dichos acopladores presentaban ciertas desventajas como un exceso importante de pérdidas. Estas desventajas han mejorado al pasar de los años y en la actualidad estos dispositivos pueden fabricarse con muy bajas pérdidas por inserción. Los acopladores de FO disponen de 4 puertos, 2 de entrada y 2 de salida. Para el diseño y fabricación de estos dispositivos, se emplea una técnica estándar por fusión y estiramiento. [33]

El análisis teórico de los acopladores se puede realizar considerando las distintas regiones que se muestran en la siguiente figura.

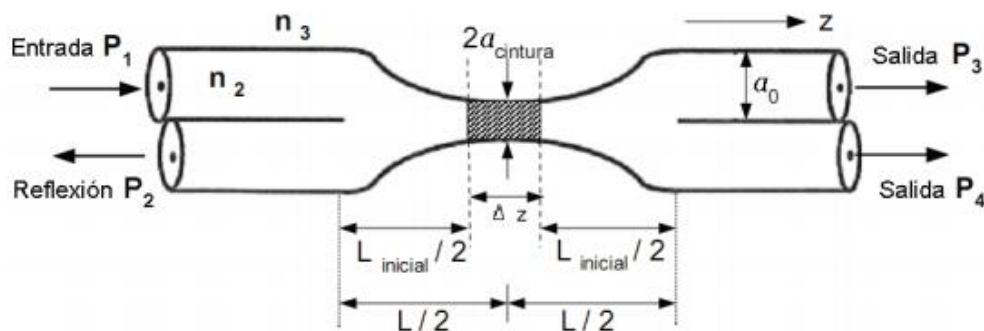


Figura 13. Esquema de un acoplador de fibra óptica indicando las características empleadas para analizar el acoplamiento de luz entre ambas fibras ópticas. [34]

Los parámetros que se consideran para el estudio del acoplamiento de luz entre ambas fibras son:

- n_2 , índice de reflexión del revestimiento de la fibra óptica.
- n_3 , índice de reflexión del medio.
- Δz , región de barrido de la antorcha.

- L , longitud de elongación del acoplador.
- $L_{inicial}$, longitud inicial de la región de acoplamiento.
- α_0 , diámetro original de la fibra óptica.
- $\alpha_{cintura}$, diámetro de la región de acoplamiento [34].

Los acopladores de FO pueden aplicarse a una extensa gama de aplicaciones como divisores de polarización [35], [36], filtros [37], [38], sensores de FO [39]–[41] y componentes para el multiplexado de longitudes de onda (*WDM, wavelength división multiplexor*) [42], [43], entre otros.

2.9 Ecuación de modos acoplados.

Una forma precisa de describir el fenómeno físico de transferencia de energía en un acoplador es usando la teoría de modos acoplados [31], deducida a partir de las ecuaciones de Maxwell y la teoría de perturbación, esta teoría nos permite conocer la interacción de los campos electromagnéticos en el dispositivo.

2.9.1 Deducción de las ecuaciones de modos acoplados para un acoplador.

Si las guías de onda se encuentran lo suficientemente cercanas entre sí, como lo muestra la figura 15, los modos de cada una de las guías de onda interactúan, interfieren o se acoplan entre sí. Las distribuciones del campo electromagnético no se ven afectadas antes o después de ser un modo acoplado, por lo que las características de propagación pueden ser analizadas por el método de perturbación.

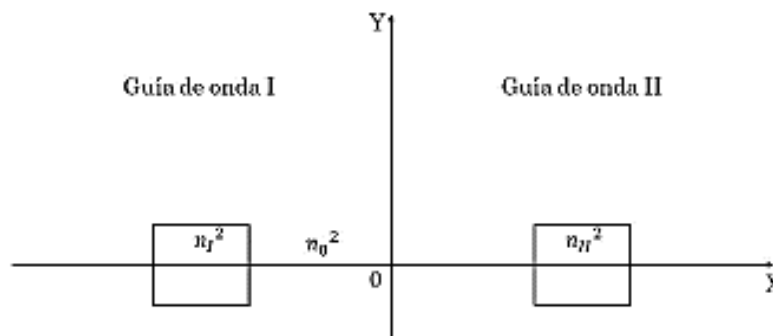


Figura 14. Guías de onda direccionales acopladas. [44]

Los modos de propagación en una guía de onda son solución a la ecuación de onda, también conocidos como eigenmodos, o modos propios, los cuales satisfacen las siguientes ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla_x \vec{E}_m = -j\omega\mu_0 \vec{H}_m \quad (m = 1,2) \quad (2.66)$$

$$\nabla_x \vec{H}_m = j\omega\epsilon_0 N_p^2 \vec{E}_m$$

Donde \vec{E}_m y \vec{H}_m representan los campos eléctrico y magnético y “m” a su modo fundamental HE_{11} con dependencia axial x e y para m igual a 1 o 2 respectivamente, ω representa la frecuencia angular, ϵ_0 y μ_0 se conocen como permitividad eléctrica y permeabilidad magnética en el vacío, $N_m^2(x, y)$ es la distribución de índice de refracción en cada guía de onda.[44]

La suma de las distribuciones de campo electromagnético de cada una de las guías de onda representa la distribución de campo del acoplador en su totalidad, esto quiere decir:

$$\vec{E}_p = A(z)\vec{E}_1 + B(z)\vec{E}_2 \quad (2.67)$$

$$\vec{H}_p = A(z)\vec{H}_1 + B(z)\vec{H}_2$$

Donde $A(z)$ y $B(z)$ representan la amplitud de los campos eléctrico y magnético para la guía de onda I y II respectivamente, mientras $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{H}_1$ y \vec{H}_2 corresponden a los campos eléctricos y magnéticos de cada guía de onda; la suma de dichos campos representa la distribución del campo electromagnético en el acoplador.

La distribución del campo de un acoplador debe de satisfacer la ecuación (2.66), tomando en cuenta la siguiente propiedad vectorial rotacional:

$$\nabla_x(A\vec{E}) = A\nabla_x\vec{E} + \nabla_x A \vec{E} = A\nabla_x\vec{E} + \frac{dA}{dz} u_z x \vec{E} \quad (2.68)$$

Sustituyendo la ecuación (2.67) en (2.66) y usando la propiedad (2.68) obtenemos la relación del campo eléctrico y magnético de un acoplador.

$$(u_z x \vec{E}_1) \frac{dA}{dz} + (u_z x \vec{E}_2) \frac{dB}{dz} = 0 \quad (2.69)$$

$$(u_z x \vec{H}_1) \frac{dA}{dz} - j\omega\epsilon_0 A(N^2 - N_1^2) \vec{E}_1 + (u_z x \vec{E}_2) \frac{dB}{dz} - j\omega\epsilon_0 A(N^2 - N_1^2) \vec{E}_1 = 0 \quad (2.70)$$

Donde $N^2(x, y)$ es la distribución de índice de refracción en todo el acoplador, u_z es el vector unitario apuntando en dirección z de las amplitudes $A(z)$ y $B(z)$.

Sustituyendo en la forma integral de la distribución de campo del acoplador las ecuaciones (2.69 y 2.70) obtenemos:

$$\iint_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_1^* \cdot (2.79) - \vec{H}_1^* \cdot (2.78) dx dy = 0 \quad (2.71)$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_2^* \cdot (2.79) - \vec{H}_2^* \cdot (2.78) dx dy = 0 \quad (2.72)$$

Resolviendo estas ecuaciones obtenemos una nueva serie de relaciones tanto para el campo eléctrico como magnético del acoplador: [31]

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz} + \frac{dB}{dz} \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_1^* x \vec{H}_2 + \vec{E}_2 x \vec{H}_1^* dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_1^* x \vec{H}_1 + \vec{E}_1 x \vec{H}_1^* dx dy} + jA \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_1^2) (\vec{E}_1^* \cdot \vec{E}_1) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_1^* x \vec{H}_1 + \vec{E}_1 x \vec{H}_1^* dx dy} + \\ jB \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_2^2) (\vec{E}_1^* \cdot \vec{E}_2) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_1^* x \vec{H}_1 + \vec{E}_1 x \vec{H}_1^* dx dy} = 0 \end{aligned} \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz} + \frac{dB}{dz} \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_2^* x \vec{H}_1 + \vec{E}_1 x \vec{H}_2^* dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_2^* x \vec{H}_2 + \vec{E}_2 x \vec{H}_2^* dx dy} + jA \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_1^2) (\vec{E}_2^* \cdot \vec{E}_1) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_2^* x \vec{H}_2 + \vec{E}_2 x \vec{H}_2^* dx dy} + \\ jB \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_2^2) (\vec{E}_2^* \cdot \vec{E}_2) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_2^* x \vec{H}_2 + \vec{E}_2 x \vec{H}_2^* dx dy} = 0 \end{aligned} \quad (2.74)$$

Separando la dependencia axial y transversal del campo electromagnético del modo de propagación se logra obtener:

$$\vec{E}_m = \vec{E}_m \text{Exp}(-j\beta_m z) \quad (2.75)$$

$$\vec{H}_m = \vec{H}_m \text{Exp}(-j\beta_m z)$$

Donde β_m es la constante de propagación para las 2 guías de onda ($m = 1, 2$) y E_m, H_m son la amplitud del campo eléctrico y magnético dependiente al modo HE_{11} .

La ecuación (2.75) lo vamos a sustituir en las ecuaciones (2.73 y 2.74) y haciendo las operaciones correspondientes se obtiene una relación que involucra a los coeficientes de

acoplamiento:

$$\frac{dA}{dz} + c_{12} \frac{dB}{dz} \text{Exp}[-j(\beta_2 - \beta_1)z] + jx_1 A + k_{12} B \text{Exp}[-j(\beta_2 - \beta_1)z] = 0 \quad (2.76)$$

$$\frac{dB}{dz} + c_{21} \frac{dA}{dz} \text{Exp}[-j(\beta_2 - \beta_1)z] + jx_2 A + k_{21} B \text{Exp}[-j(\beta_2 - \beta_1)z] = 0 \quad (2.77)$$

Entonces los coeficientes de acoplamiento son:

$$k_{pq} = \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_q^2) (\vec{E}_p^* \cdot \vec{E}_q) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_p^* x \vec{H}_p + \vec{E}_p x \vec{H}_p^*) dx dy} \quad (2.78)$$

$$c_{pq} = \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_p^* x \vec{H}_q + \vec{E}_q x \vec{H}_p^*) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_p^* x \vec{H}_p + \vec{E}_p x \vec{H}_p^*) dx dy} \quad (2.79)$$

$$x_p = \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_p^2) (\vec{E}_p^* \cdot \vec{E}_p) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (\vec{E}_p^* x \vec{H}_p + \vec{E}_p x \vec{H}_p^*) dx dy} \quad (2.80)$$

El valor de $(p, q = 1, 2)$ o $(2, 1)$ representan el subíndice de los coeficientes de acoplamiento de la guía de onda I respecto a la guía de onda II o viceversa. Mientras que k_{pq} es el coeficiente de acoplamiento de un acoplador direccional, c_{pq} también expresa un coeficiente de acoplamiento. Se puede describir dicho coeficiente c_{pq} como lo muestra la figura (16), donde la guía de onda I solo existe en la región $z < 0$ y la guía de onda II en $z \geq 0$. Por ende cuando el eigenmodo (E_1, H_1) de la guía de onda I se propaga en dirección $-z$ hasta el origen, el campo electromagnético en el revestimiento excita el eigenmodo (E_1, H_1) de la guía de onda II en el punto $z = 0$. Entonces a esta eficiencia de excitación de modos se le conoce como el coeficiente de acoplamiento c_{pq} en la interfaz de dos guías de ondas. [44]

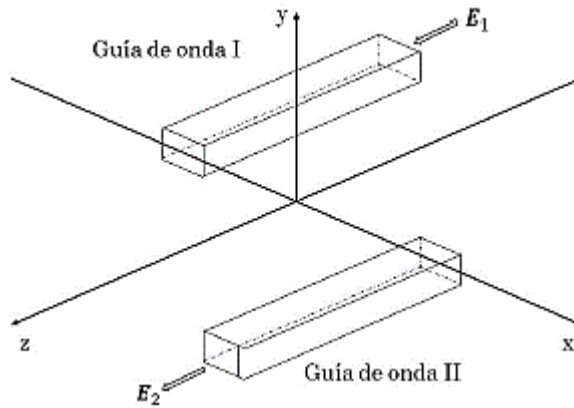


Figura 15. Coeficiente de acoplamiento c_{pq} en la interfaz de 2 guías de onda.[44]

2.10 Acoplador Codireccional.

Es un dispositivo cuya característica es la de guiar los haces de luz en el mismo sentido de la propagación inicial, siendo las configuraciones generales para dispositivos de FO de 2x2 o 1x2 en cuanto a los puertos de entrada y salida respectivamente, teniendo las características en su respectiva propagación ($\beta_1 > 0, \beta_2 > 0$).

Usando la teoría de modos acoplados tenemos las ecuaciones diferenciales que representan el fenómeno físico de dicho dispositivo:

$$\frac{dA}{dz} = -jk_{12}B \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] \quad (2.81)$$

$$\frac{dB}{dz} = -jk_{21}A \exp[+j(\beta_2 - \beta_1)z] \quad (2.82)$$

Se asume las soluciones de dichas ecuaciones como:

$$A(z) = [a_1 e^{jqz} + a_2 e^{-jqz}] \exp(-j\delta z) \quad (2.83a)$$

$$B(z) = [b_1 e^{jqz} + b_2 e^{-jqz}] \exp(j\delta z) \quad (2.83b)$$

Para encontrar las constantes a_1, a_2, b_1 y b_2 usaremos la condición inicial $z = 0$, satisfaciendo lo siguiente:

$$A(0) = a_1 + a_2 \quad (2.84a)$$

$$B(0) = b_1 + b_2 \quad (2.84b)$$

Substituyendo las ecuaciones (2.83) en las ecuaciones de modos acoplados (2.81 y 2.82), además aplicando las condiciones iniciales de 2.84, se obtiene.

$$A(z) = \left\{ \left[\cos(qz) + j \frac{\delta}{q} \sin(qz) \right] A(0) - j \frac{k}{q} \operatorname{sen}(qz) B(0) \right\} \exp(-j\delta z) \quad (2.85)$$

$$B(z) = \left\{ -j \frac{k}{q} \operatorname{sen}(qz) A(0) + \left[\cos(qz) - j \frac{\delta}{q} \operatorname{sen}(qz) \right] B(0) \right\} \exp(j\delta z) \quad (2.86)$$

Estas ecuaciones reproducen los elementos de la matriz de transmisión, e igual forma describen la amplitud del campo eléctrico y magnético a lo largo del eje de propagación z del acoplador direccional. Esta zona se conoce como región de acoplamiento y las amplitudes del campo electromagnético $A(z)$ y $B(z)$ son dependientes una respecto a la otra de acuerdo a su condición inicial. [45]

2.11 Diseño de acopladores de FO.

El procedimiento para la fabricación de los acopladores de FO se desarrollará en la parte experimental, detallando el procedimiento completo desde su inicio hasta el final de su fabricación conjuntamente con las pruebas correspondientes.

La técnica empleada para la fabricación de los acopladores es la de tracción, y presenta una ventaja muy importante y es la de poder detener el proceso en cualquier momento, esto implica que nos permite fabricar acopladores con cualquier razón de acoplamiento de una manera precisa y confiable.

A continuación, se muestra un acoplador fabricado por medio de esta técnica, así como la dirección de propagación de los haces de luz dentro de este.

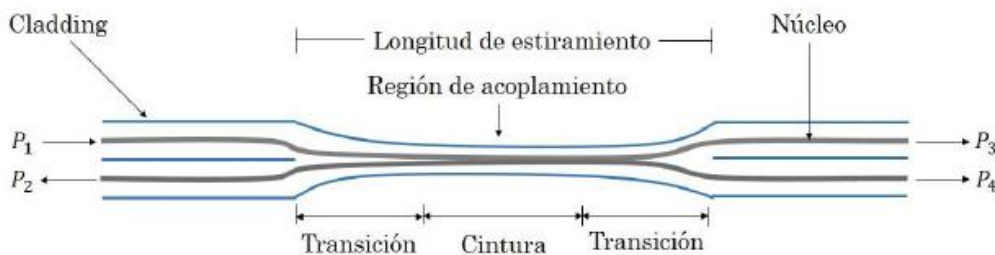


Figura 16. Acoplador fabricado mediante la técnica de tracción.[46]

La caracterización típica de un acoplador, se obtiene al medir la relación de acoplamiento, las pérdidas por inserción, exceso de pérdidas y directividad. Para ello es necesario medir la potencia óptica en los puntos P_2, P_3 y P_4 . Usando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Razon de acoplamiento } R(\%) = \frac{P_4}{P_3+P_4} \times 100 \quad (2.87)$$

$$\text{Exceso de perdidas (dB)} = 10 \log \frac{P_1}{P_3+P_4} \quad (2.88)$$

$$\text{Perdidas por inserción (dB)} = 10 \log \frac{P_1}{P_4} = \text{Exceso de perdidas} + R(\text{dB}) \quad (2.89)$$

$$\text{Directividad (dB)} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (2.90)$$

Relación de acoplamiento, dicho parámetro relaciona la potencia óptica que ingresa al puerto de entrada P_1 y las potencias que aparecen en los puertos acoplados P_3 y P_4 .

Perdidas por inserción, dichas pérdidas se producen en el camino entre el puerto de entrada y los puertos de salida, exclusivamente por el medio de transmisión que une los puertos.

Directividad, dicho parámetro refleja la capacidad del acoplador para transferir potencia desde su puerto de entrada P_1 hasta los puertos acoplados (P_3, P_4), rechazando la potencia que puede existir del puerto de salida P_2 debido a las reflexiones. [46]

2.12 Interferometría.

La interferometría es una de las técnicas ópticas no destructivas más importantes, su principio consiste en la interacción o interferencia entre dos ondas luminosas que se encuentran una con otra. Un claro ejemplo es que cuando una cresta de una onda coincide con el valle de otra onda, se presenta un caso de interferencia destructiva y ambas ondas se anulan. Por otra parte, cuando las dos crestas o valles coinciden, estas se refuerzan mutuamente, presentándose una interferencia constructiva. [47]

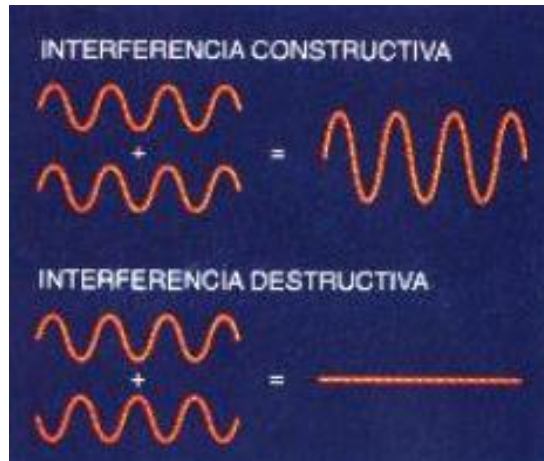


Figura 17. Parte superior, Interferencia constructiva. Parte inferior, Interferencia destructiva. [47]

Los interferómetros se pueden dividir en dos clases:

- a. Los basados en la división del frente de onda: En este caso se usan porciones de la primera onda como si fuera una fuente y emitir nuevas ondas secundarias, para luego hacer que se encuentren e interfieran.
- b. Los que se fundamentan en la división de la amplitud: En este grupo las ondas primarias se dividen en dos segmentos los cuales viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir. [47]

2.13 Interferómetro de Mach-Zehnder.

Los físicos Ludwig Mach y Ludwig Zehnder desarrollaron el interferómetro que lleva su nombre [47]. Es uno de los dispositivos más versátiles e importantes en la óptica integrada y se compone de tres partes fundamentales: una unión Y a la entrada, dos guías de onda paralelas, y una unión Y a la salida. El funcionamiento inicia cuando la luz entrante se dirige hacia la primera unión Y el cual divide el haz en dos (idealmente al 50%), propagándose los dos haces de manera independiente en cada una de las dos ramas superior e inferior. Y, por último, la otra unión Y es la encargada de recombinar los dos haces en una única guía [48], mediante disposiciones adecuadas de espejos y prismas [47]. A continuación, se muestra el esquema de un interferómetro de Mach-Zehnder.

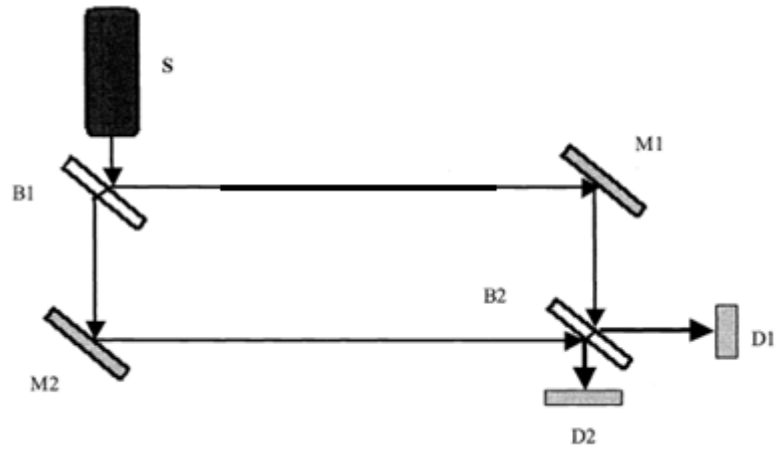


Figura 18. Diagrama esquemático del interferómetro de Mach-Zehnder. [49]

Una de las ventajas del interferómetro es que permite colocar elementos desconocidos en uno de los haces sin que la otra rama se vea afectada, originando una alteración en el camino óptico, por lo cual se cambia el patrón de interferencia debido a un cambio de fase ($\Delta\phi$) en el campo eléctrico de la luz que viaja en el medio a analizar. [47]

3. PARTE EXPERIMENTAL.

En este capítulo se presentará la metodología realizada para la fabricación de los *tapers*, detallando el proceso de fabricación para la elaboración experimental de las mismas. Además, en cada proceso se detallan los parámetros necesarios para la obtención de *tapers* con bajas pérdidas, y para su posterior optimización.

Además de la elaboración de los *tapers*, se muestra la metodología para la elaboración de acopladores biconicos guiándose de los parámetros adecuados obtenidos de manera experimental. Finalmente se muestran los acopladores con las razones de acoplamiento obtenidas de manera precisa ya que se utilizó la técnica de tracción que permite tener el control del movimiento de la flama, la velocidad de la fuente de calor, la longitud de estirado e incluyendo detener el proceso en cualquier instante y obtener las razones de acoplamiento que uno desee.

Las fibras adelgazadas se utilizan para acoplar luz entre dos FO (acopladores de fibra), así como para excitar propagación de la luz en el revestimiento y luego acoplarlo de nuevo al núcleo, sin necesitar una estricta uniformidad de forma, ni un diámetro muy pequeño. [31] En 1992, Birks y Li desarrollaron una teoría de adelgazamiento de la fibra, verificada experimentalmente con el uso la técnica de tracción usando una fuente de calor (*flame-brushing*). [50]

3.1 Sistema de Adelgazamiento.

Se utilizó para el presente trabajo la técnica de tracción ya que es una de las técnicas que se utiliza con mayor frecuencia para la elaboración de los *tapers*, así como de los acopladores de FO. Posteriormente la implementación del Interferómetro de Mach-Zahnder modificado donde se reemplaza los dos espejos y un semiespejo por el acoplador fabricado con una razón de acoplamiento de 50/50. Esta técnica como se mencionó en el punto 3 nos permite controlar los parámetros necesarios como la velocidad de la fuente de calor, el movimiento de la flama y la longitud de estirado de la fibra.

El sistema electro-mecánico que se encontró inicialmente en el laboratorio de óptica fotónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, se basa en cuatro poleas unidas mediante una cuerda, los cuales tenían la función de adelgazar las fibras juntamente con un

mini-sistema de traslación mediante motores de pasos y otra para el movimiento de la flama oscilante que va calentando la parte desnuda de la fibra. Este primer prototipo era muy inestable al momento de estirar las fibras.

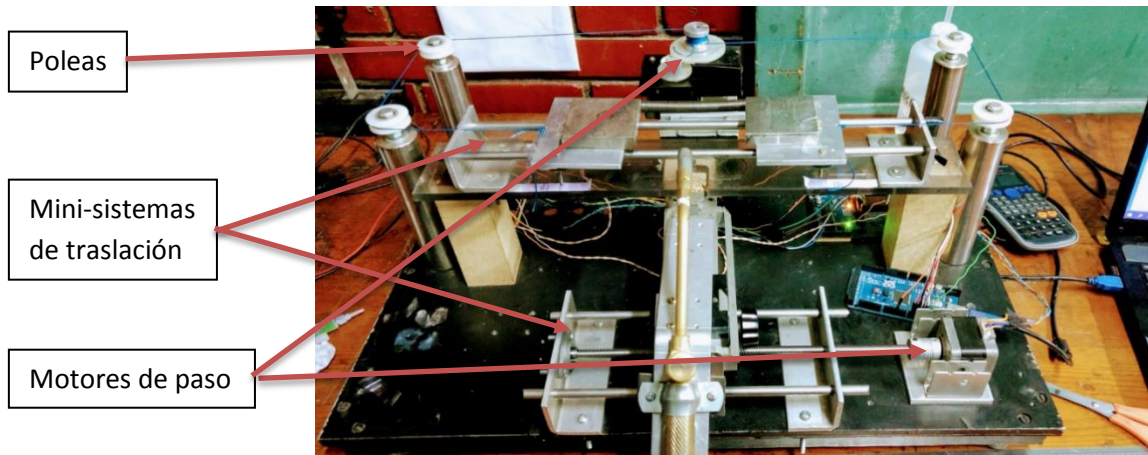


Figura 19. Primer sistema electro-mecánico.

Debido a estos inconvenientes con el sistema electro-mecánico, se optó por optimizar dicho sistema obteniendo un nuevo sistema el cual cuenta con dos motores a pasos que presentan 4 cables de control, el ángulo de paso es de 1.8 grados, la alimentación es de 12V; uno de ellos se encuentra unido mediante una correa en el extremo de la varilla de 80 cm que soportan a las mesas de alargamiento de la fibra y el otro motor unido igualmente a una correa a la varilla del movimiento del soplete por donde viaja la flama oscilante. Se observó que el trabajo que realizaba el motor a pasos no era lo suficientemente efectivo en los movimientos que deseábamos por ende se incluyó un reductor planetario cuya función es reducir la velocidad de giro del motor a paso en una relación de 25:1.

Para el sistema de estirado utilizamos dos bases los cuales sujetan a la fibra durante el proceso de adelgazamiento, la cual se desplaza sobre unas guías deslizantes, también utilizamos una varilla de 16mm de diámetro y 50 cm de largo, dos chumaceras de pie de 8mm de diámetro interno, dos poleas dentadas de 20 dientes y 8mm de diámetro interno.

El sistema de calentamiento utilizado para la fabricación se construyó con las siguientes características teniendo en cuenta que la FO no pierda sus propiedades mecánicas ni ópticas. Consta de un soplete, dos poleas de 20 dientes cada una, con 8mm y 5mm de diámetro interno respectivamente, una varilla roscada de 30 cm de largo con 8mm de diámetro, motor a pasos y una correa dentada para su perfecto funcionamiento.

A continuación, se muestra el nuevo sistema electro-mecánico para el adelgazamiento de las FO. Observamos que la fibra está sujeta a las bases móviles que cumplen la función de alargar las fibras mediante el sistema de traslación izquierda-derecha generada por la rotación de la varilla, sujeta a un programa de simulación basado en el hardware Arduino. El segundo motor presentado es para el movimiento del soplete a lo largo de la zona donde la cubierta ha sido retirada de la fibra, al igual que las bases móviles el movimiento del soplete se debe también a un programa de simulación del hardware Arduino.

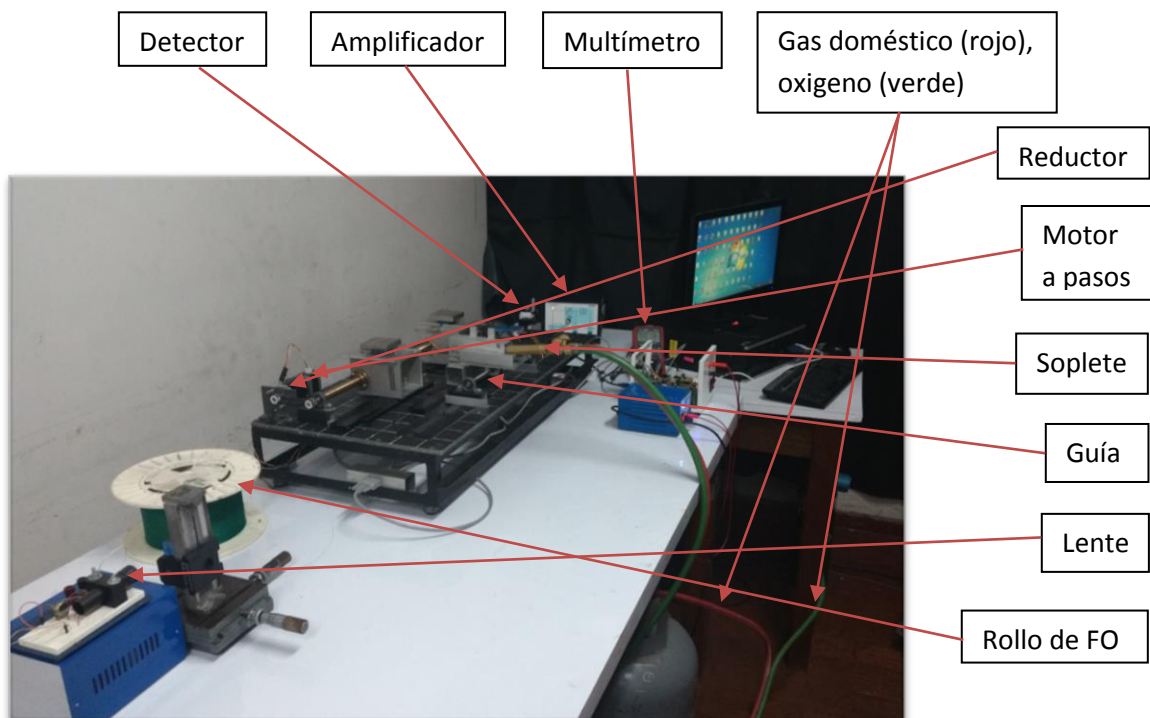


Figura 20. Nuevo sistema electro-mecánico optimizado.

3.2 Fabricación de los *Tapers*.

Los parámetros adecuados que se establecieron para un correcto adelgazamiento de las fibras se obtuvieron de las experiencias, el cual nos condujo a resultados positivos. Para fabricar los *tapers*, la maquina cuenta con un detector para la detección de la potencia. El procedimiento para la elaboración experimental de los *tapers* se detalla a continuación:

1. Encender el equipo, preparar el software y los motores.
2. Preparar la fibra, quitar el recubrimiento de las puntas y de la zona a adelgazar sumergiéndolos en acetona para extraer más fácilmente el revestimiento.

3. Limpiar las puntas de la fibra, así como la zona a adelgazar con acetona para eliminar cualquier rastro de impureza que pueda interferir con la señal.
4. Una de las puntas de la fibra se coloca en la fuente de luz (foto emisor), la otra punta se coloca en el foto-detector, mientras que la zona descubierta a adelgazar se coloca entre las bases sujetadoras.
5. Se abre la válvula del balón de oxígeno y del gas casero para prender el soplete y ajustar la flama a una temperatura adecuada (aproximadamente 850°C) para el adelgazamiento.
6. Se coloca los parámetros adecuados en el programa del ordenador para los movimientos tanto de las bases sujetadoras como del soplete. A continuación, se presiona el circuito de control para tal fin.
7. Durante el proceso de adelgazamiento se monitoriza la potencia de salida, mediante el sistema de detección (foto detector, foto amplificador y multímetro) que a su vez está unido al computador mediante un programa propio del multímetro el cual capta la lectura del detector cada segundo del tiempo establecido para el adelgazamiento.
8. Se detiene el sistema en el tiempo establecido, obteniendo el *taper* con el diámetro de cintura deseado. Se apaga la flama y se coloca el *taper* con mucho cuidado sobre el portaobjetos.
9. Se cierra la válvula tanto del balón de oxígeno como del gas.
10. De igual manera se cierra el programa del ordenador y se apaga el computador.

Con el sistema eléctrico-mecánico optimizado se realizó la fabricación de los *tapers* con fibras SMF-28 de la empresa SIECOR, que presenta un diámetro de revestimiento de $125\mu m$ con $n_{co} = 1,4675$ y un diámetro de núcleo de $8\mu m$, el cual posee un $n_{cl} = 1,4681$.

A continuación, se detallan los parámetros generales para la elaboración de los *tapers* de una forma adecuada (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros generales para la fabricación de los *tapers* y acopladores.

Ancho de la Flama	(1.5 – 2)mm
Velocidad de Estirado	4mm/min
Temperatura de la Flama	(847 – 850)°C
Velocidad de la Fuente de Calentamiento	5.95mm/s
Diámetro de la Fibra	125um
Diámetro del núcleo de la Fibra	8um

A continuación, se muestran las tablas de los *tapers* en grupos de 5 los cuales se agrupan según el diámetro de cintura y zona de calentamiento.

Tabla 2. Parámetros de fabricación para los *tapers* 1, 2, 3, 4 y 5.

Parámetro	Valor
Longitud de la zona de calentamiento.	3 mm
Diámetro de la cintura.	15 um
Tiempo.	152 s

Tabla 3. Parámetros de fabricación para los *tapers* 6, 7, 8, 9 y 10.

Parámetro	Valor
Longitud de la zona de calentamiento.	3 mm
Diámetro de la cintura.	20 um
Tiempo.	131 s

Tabla 4. Parámetros de fabricación para los *tapers* 11, 12, 13, 14 y 15.

Parámetro	Valor
Longitud de la zona de calentamiento.	3.5 mm
Diámetro de la cintura.	20 μ m
Tiempo.	154 s

Tabla 5. Parámetros de fabricación para los *tapers* 16, 17, 18, 19 y 20.

Parámetro	Valor
Longitud de la zona de calentamiento.	3.5 mm
Diámetro de la cintura.	15 μ m
Tiempo.	178 s

3.3 Fabricación de los acopladores de fibra óptica.

Para la fabricación de los acopladores, el sistema optimizado electro-mecánico cuenta con un solo foto-amplificador el cual fue utilizado para detectar la potencia de salida del puerto 4 del acoplador. En el caso de los acopladores el proceso de elaboración es similar al de la fabricación de los *tapers*, salvo que la diferencia está en que se emplea dos fibras ópticas. El trenzado de las fibras es un punto muy importante en la elaboración de los acopladores, ya que se intentaron varias posiciones y número de vueltas, obteniendo mediante la experimentación el trenzado más adecuado y efectivo en la región a estrechar. El número de trenzado más efectivo fue el de dos vueltas para la obtención de un acoplamiento más adecuado.

La temperatura aplicada para la fabricación de los acopladores es uniforme al igual que en la fabricación de los *tapers* y esto me permitió estirarlas sin causar alguna fractura o rotura.

3.4. Implementación del Interferómetro de Mach-Zehnder modificado.

Para la implementación del interferómetro de Mach-Zehnder modificado se utilizó una mesa óptica, el acoplador elaborado con razón de acoplamiento 50/50, un láser con una longitud de onda $\lambda=633\text{nm}$ y 5mW de potencia, un semiespejo con 50/50 de transmisión /reflexión, un sensor (cámara de video), dos guías sujetadoras para las ramas 3 y 4 del acoplador, un sujetador para el primer puerto de entrada del acoplador cuya función es estabilizar y hacer que la intensidad de luz penetre adecuadamente por dicho puerto, dejando libre el puerto 2. La parte adelgazada del acoplador descansa sobre un portaobjetos para su debido cuidado y así evitar dañarlo. Las guías que sujetan las ramas 3 y 4 del acoplador forman un ángulo de 90° entre sí, el semiespejo se ubica formando un ángulo de 45° respecto a las dos guías y el detector se ubica en el eje de la rama del puerto 4. El haz de luz que sale por el puerto 3 llega al semiespejo reflejándose hacia la cámara y el haz de luz del puerto 4 llega al semiespejo transmitiéndose hacia la cámara, llegando a formar la interferencia entre estos dos haces.

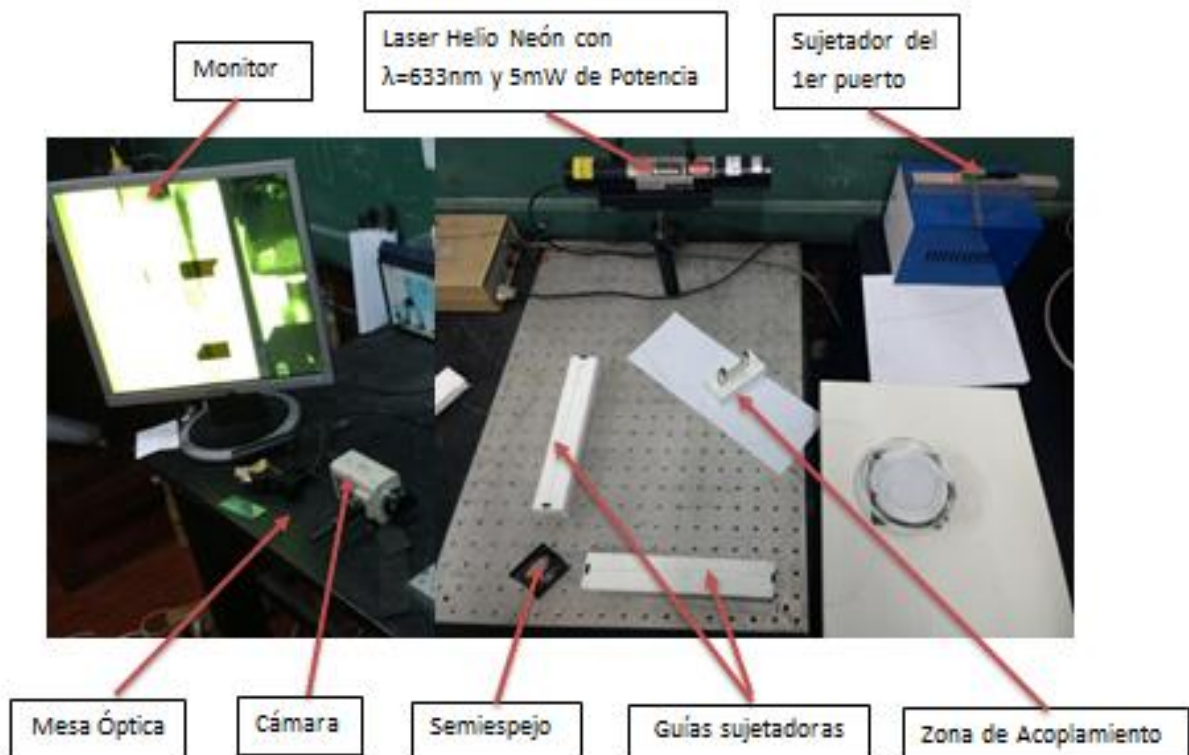


Figura 21. Diseño del interferómetro de Mach-Zahnder modificado, fabricado con el acoplador de razón de acoplamiento de 50/50.

4 RESULTADOS.

4.1 Resultado de los *Tapers*.

Se realizó la fabricación de los primeros *tapers* con el sistema optimizado electro-mecánico guiándonos tanto de la parte teórica como del programa de simulación; seguidamente se realizó la verificación del cuello de los *tapers* con la ayuda de la cámara del microscopio arrojándonos los siguientes resultados que se muestra a continuación:

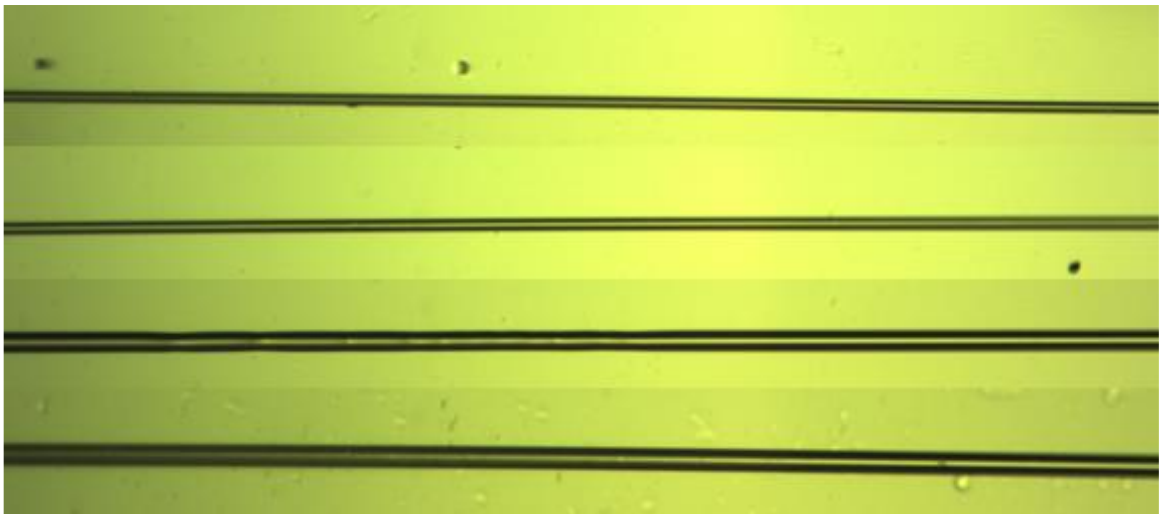


Figura 22. Imagen tomada por la cámara del microscopio de los *tapers* fabricados con diámetro de cintura igual a 8, 10, 15 y 20 μm observados de arriba hacia abajo respectivamente.

Se detalla en la figura anterior los *tapers* cuya longitud de zona de calentamiento varía entre los (3 mm – 3.5 mm), con distintos tiempos empleados y una temperatura de la flama constante que se mencionaron en las tablas anteriores logrando obtener diferentes diámetros de cinturas (8, 10, 15 y 20 μm) antes que la FO se quebrara o doblara y colocando la zona adelgazada en portaobjetos para su mejor seguridad y posterior toma de imagen y almacenaje.

Uno de los conceptos importantes para saber el porcentaje de reducción de la fibra en el adelgazamiento es la relación de conicidad R del *taper*. En el siguiente cuadro se muestra los resultados de los 10 primeros *tapers* fabricados utilizando los parámetros antes mencionados, manteniendo la temperatura constante y longitudes L_0 constantes, para la obtención de *tapers* con diferente diámetro de cintura (D_c).

Tabla 6. Datos de los *tapers* obtenidos experimentalmente con temperatura constante.

N° de <i>tapers</i>	Temperatura de la flama (°C)	Longitud L_0 (mm)	Relación de conicidad (R)	Diámetro de cintura D_c (um)
1	850	10	0.38	47
2	850	10	0.36	45
3	850	10	0.34	43
4	850	10	0.32	40
5	850	10	0.29	37
6	850	10	0.28	35
7	850	10	0.25	32
8	850	10	0.24	30
9	850	10	0.23	29
10	850	10	0.21	27

Los resultados obtenidos para la relación de conicidad R se muestran en la figura 23, con respecto a la longitud de estirado para una zona de calentamiento y diámetros de cintura indicados en la tabla 6.

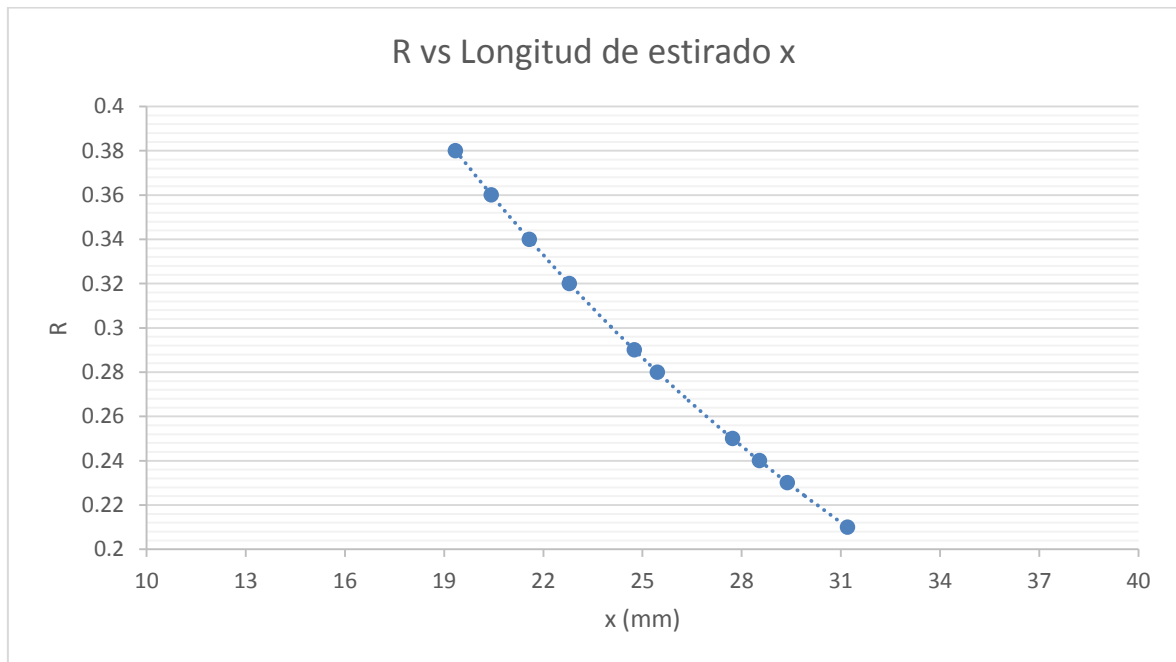


Figura 23. Relación de conicidad R respecto a la longitud de estirado x de los 10 primeros *tapers*.

El gráfico anterior nos muestra la relación de conicidad respecto a la longitud de estirado para 10 tapers que fueron fabricados bajo los mismos parámetros indicados en la tabla 1 (velocidad de estirado, temperatura de la flama oscilante, ancho de la flama, velocidad de la fuente de calentamiento), esta relación toma la forma de decaimiento exponencial que concuerda con la parte teórica específicamente lo que describen las ecuaciones 2.58 y 2.60 tanto para una zona de calentamiento constante $L_0 = 10 \text{ mm}$. Se menciona por otra parte que se realizó este perfil con la fabricación de 10 *taper* debido a que no se contaba con un sensor que detectara insitu el diámetro de cintura de estirado en el proceso de adelgazamiento.

Otro aspecto que es de nuestro interés para la determinación de que, si un *taper* es competente o no, es monitorear la propagación de la luz en pleno adelgazamiento de la FO. Para esta tarea se hizo incidir luz mediante un láser de 633nm en un extremo de la fibra, con un foto-detector medimos la intensidad mediante un multímetro que proporciona los datos en mV.

Se realizó el registro experimental de varios *tapers* con diámetros de cintura y zonas de calentamiento diferentes. A continuación, se muestran 3 de ellas con sus respectivas pérdidas.

Tabla 7. Parámetros para la fabricación del *taper* n°1 con pérdidas del 5%.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3 mm
Diámetro de cintura D_c	20 μm
Tiempo	131 s
Voltaje de entrada	3.7 mV
Voltaje de salida	3.5 mV

En la figura 24 se muestra la evolución de la intensidad durante el proceso de adelgazamiento del *taper* n°1.

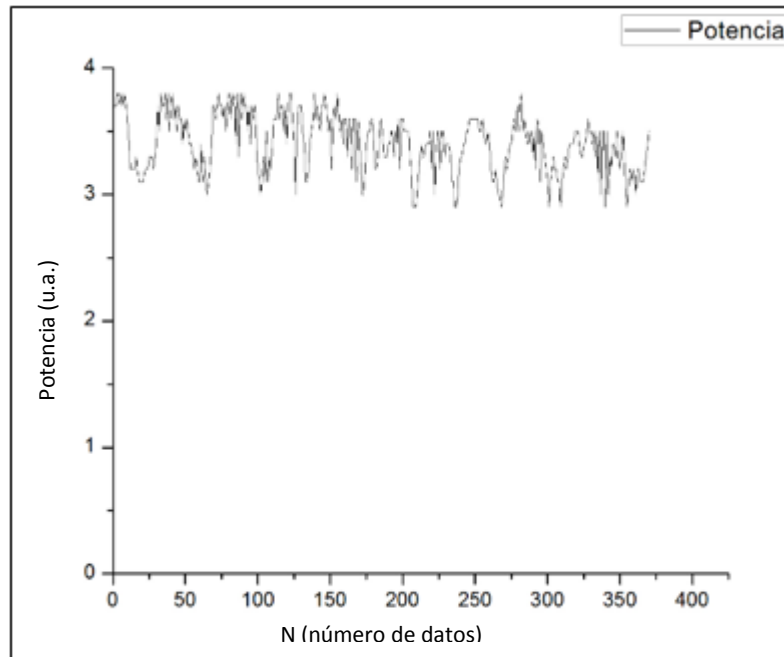


Figura 24. Pérdidas de voltaje del *taper* n°1, con diámetro de cintura 20 μm .

Se observa en la figura 24 que la señal a la salida taper no disminuye considerablemente, lo cual indica que la pérdida es pequeña. Por otro lado, se observa también algunas pequeñas modulaciones que se puede atribuir al ruido existente en el proceso de adelgazamiento.

La siguiente tabla muestra los parámetros que se utilizó para la fabricación del taper n°2.

Tabla 8. Parámetros para la fabricación del *taper* n°2 con pérdidas del 7%.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3 mm
Diámetro de cintura D_c	15 μm
Tiempo	152 s
Voltaje de entrada	2.8 mV
Voltaje de salida	2.6 mV

En la figura 25 se muestra la evolución de la intensidad durante el proceso de adelgazamiento del *taper* n°2.

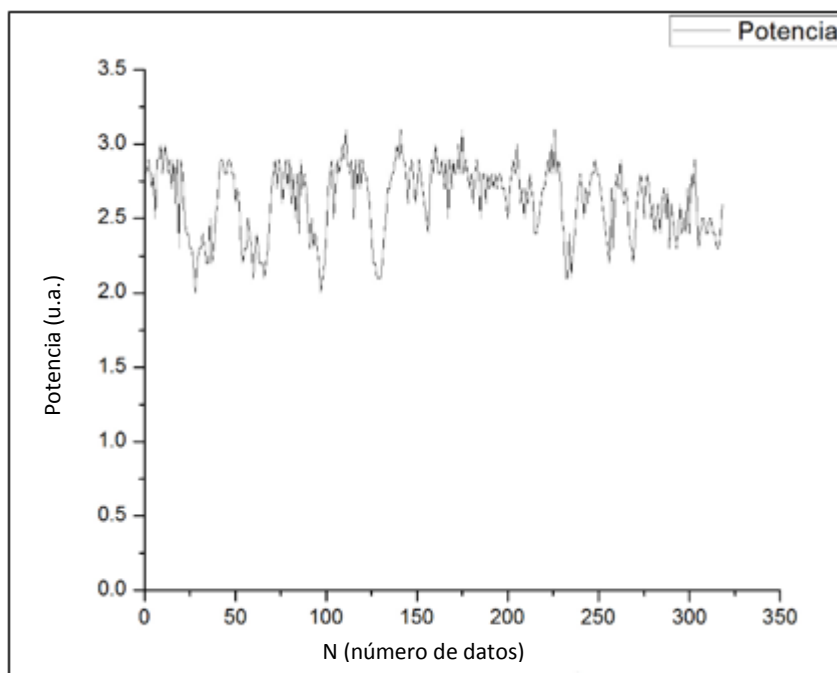


Figura 25. Pérdidas de voltaje del *taper* 2, con diámetro de cintura 15 μm .

Se observa en la figura 25 que la señal a la salida del *taper* n°2 no disminuye considerablemente al igual que el *taper* n°1. Por otro lado, observándose también las mismas modulaciones atribuidos al proceso de adelgazamiento de la fibra.

El *taper* n°3 se realizó con el mismo diámetro de cintura y misma zona de calentamiento que el *taper* n°1. Esto se hizo para verificar si la pérdida de voltaje en el transcurso del adelgazamiento mejoró con respecto al anterior.

Tabla 9. Parámetros para la fabricación del *taper* n°3 con pérdidas del 23%.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3 mm
Diámetro de cintura D_c	20 μm
Tiempo	131 s
Voltaje de entrada	13.3 mV
Voltaje de salida	10.2 mV

En la figura 26 se muestra la evolución de la intensidad durante el proceso de adelgazamiento del *taper* n°3.

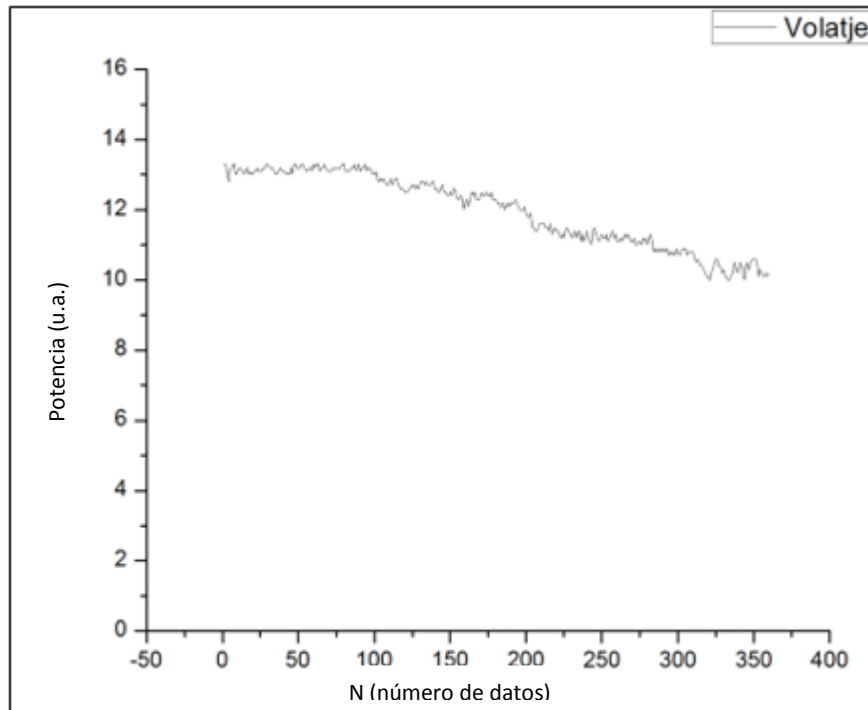


Figura 26. Perdidas de voltaje del *taper* 3, con diámetro de cintura 20 μm .

Se aprecia en la figura 26 que presenta mayor atenuación que el *taper* n°1, esto se puede deber a factores mecánicos como el controlar la temperatura de la flama oscilante debido a que dicho adelgazamiento se realizó en fechas diferentes al del *taper* n°1. Este factor mecánico existente se debe mejorar en nuestro sistema electro-mecánico, con un sistema que controle dicho factor durante todo el proceso de adelgazamiento.

A continuación, se muestran los tres *tapers* mencionados anteriormente los cuales se encuentran en portaobjetos para su debida protección y evitar algunas roturas o doblamientos.



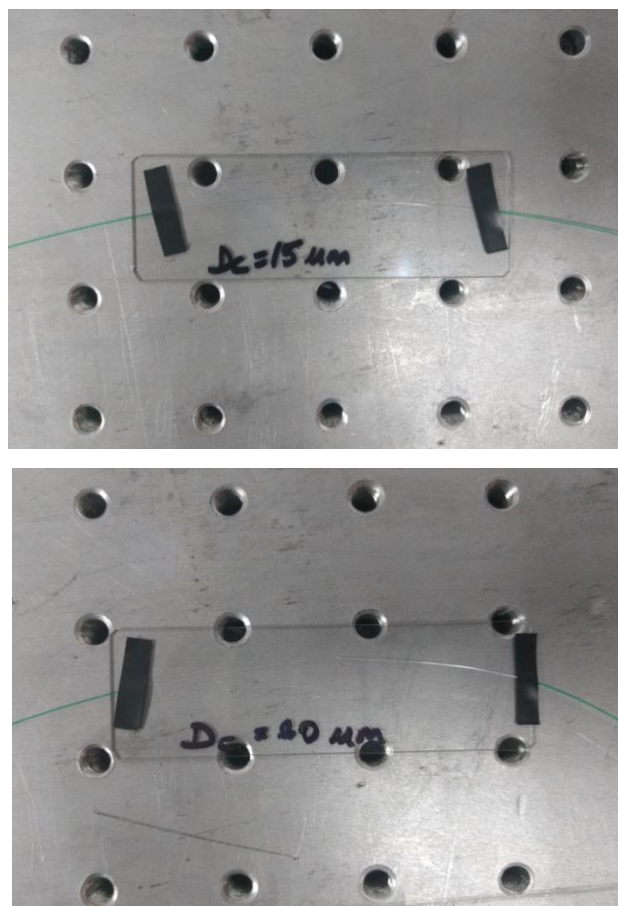


Figura 27. *Tapers* fabricados con D_c (20 μm – 15 μm) en el laboratorio de óptica fotónica.

4.2 Resultado de los Acopladores.

Se presenta 3 de los acopladores fabricados con el sistema electro-mecánico guiándonos tanto de la parte teórica como del programa de simulación; seguidamente se realizó la verificación de los resultados de las mediciones de cada uno de ellos, las cuales se muestran a continuación.

Acoplador biconico n°1.

Tabla 10. Parámetros para la fabricación del acoplador biconico n°1.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3.5 mm
Diámetro de cintura D_c	20 μ m
Tiempo	154 s
Voltaje de entrada	8.1 mV
Voltaje Puerto 3	3.8 mV
Voltaje Puerto 4	4.1 mV

Se realiza los cálculos respectivos para hallar la razón de acoplamiento, la pérdida de inserción y el exceso de pérdidas respectivamente usando las siguientes ecuaciones.

$$\text{Razon de acoplamiento } R(\%) = \frac{P_4}{P_3 + P_4} \times 100$$

$$\text{Perdidas por insercion (dB)} = 10 \log \frac{P_1}{P_4}$$

$$\text{Exceso de perdidas (dB)} = 10 \log \frac{P_1}{P_3 + P_4}$$

Reemplazando los datos mencionados en la tabla 10, obtenemos:

$$R(\%) = \frac{4.1}{3.8 + 4.1} \times 100 = 52$$

$$R(\%) = \frac{3.8}{3.8 + 4.1} \times 100 = 48$$

$$\text{Perdidas por insercion (dB)} = 10 \log \frac{8.1}{4.1} = 2.9 \text{ dB}$$

$$\text{Exceso de perdidas (dB)} = 10 \log \frac{8.1}{3.8 + 4.1} = 0.1 \text{ dB}$$

A continuación, se muestra el comportamiento de la transmisión de potencia del primer acoplador biconico durante el proceso de adelgazamiento cuyo diámetro final de cintura fue de $20\ \mu\text{m}$.

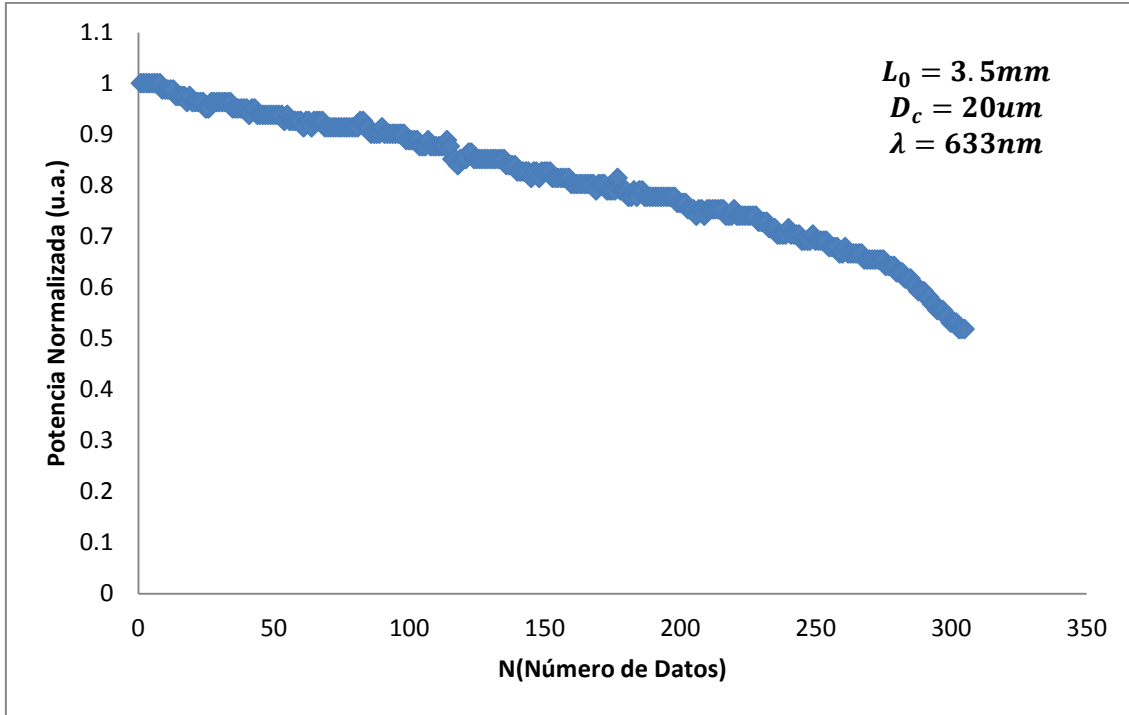


Figura 28. Potencia Normalizada vs N (Número de Datos) del acoplador n°1 con $D_c = 20\mu\text{m}$.

Mediante el análisis de la gráfica se muestra el comportamiento de la transmisión de potencia, se logra observar que el acoplador presenta una disminución progresiva de la potencia durante el proceso de adelgazamiento tanto que en el último tramo del tiempo empleado (aproximadamente en el punto 2.71,0.75) se nota una bajada más pronunciada, esto puede deberse a que el acoplador tendía a quebrarse o existiera en la zona a adelgazar impurezas que afectan negativamente el proceso de fabricación del acoplador. Con la fabricación del acoplador se logró alcanzar una razón de acoplamiento de 52/48, pérdidas por inserción de 2.9 dB y un exceso de pérdidas de 0.1 dB.

Acoplador biconico n°2.

Tabla 11. Parámetros para la fabricación del acoplador biconico n° 2.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3 mm
Diámetro de cintura D_c	35 μm
Tiempo	91 s
Voltaje de entrada	10.3 mV
Voltaje Puerto 3	5 mV
Voltaje Puerto 4	5 mV

Se realiza los cálculos respectivos para hallar la razón de acoplamiento, perdida por inserción y el exceso de pérdidas.

Reemplazando los datos mencionados en la tabla 11, obtenemos:

$$R(\%) = \frac{5}{5 + 5} \times 100 = 50$$

$$R(\%) = \frac{5}{5 + 5} \times 100 = 50$$

$$\text{Perdidas por insercion (dB)} = 10 \log \frac{10.3}{5} = 3.1 \text{ dB}$$

$$\text{Exceso de perdidas (dB)} = 10 \log \frac{10.3}{5 + 5} = 0.1 \text{ dB}$$

A continuación, se muestra el comportamiento de la transmisión de potencia del segundo acoplador biconico durante el proceso de adelgazamiento cuyo diámetro final de cintura fue de 35 μm .

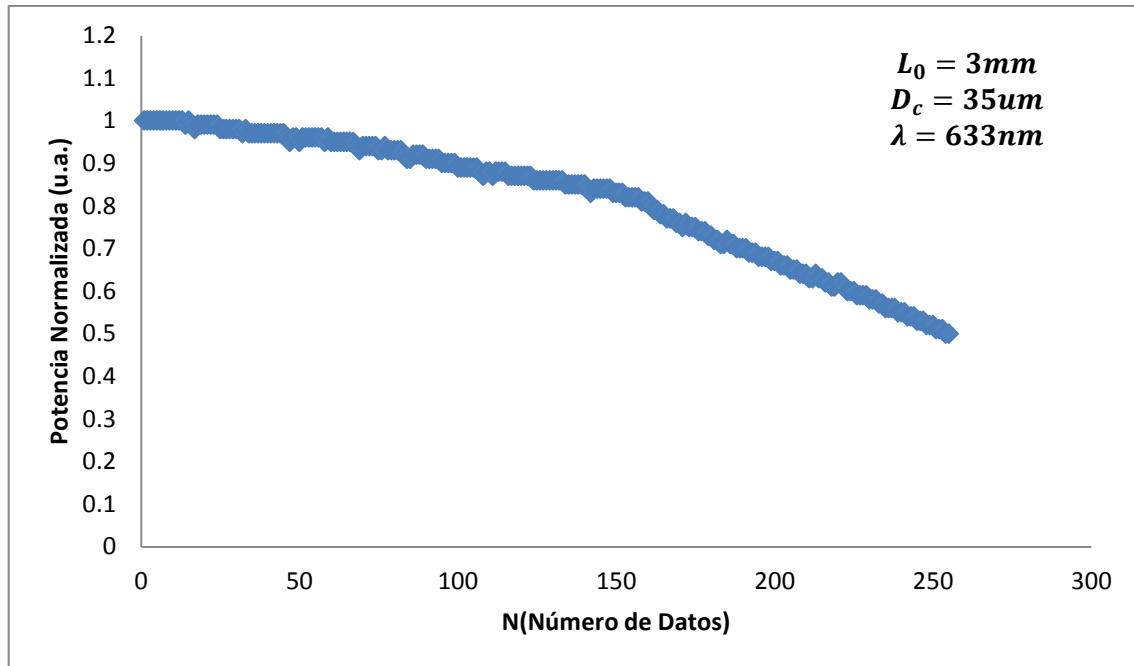


Figura 29. Potencia Normalizada vs N (Número de Datos) del acoplador n°2 con $D_c = 35\mu m$.

Mediante el análisis de la gráfica se muestra el comportamiento de la transmisión de potencia, se logra observar que el acoplador presenta una disminución progresiva de la potencia durante el proceso de adelgazamiento tanto que aproximadamente en el punto (155,0.82) se nota una bajada más pronunciada, esto puede deberse a que el acoplador tiende a quebrarse o existiera en la zona a adelgazar impurezas que afectan negativamente el proceso de fabricación del acoplador. Con la fabricación del acoplador se logró alcanzar una razón de acoplamiento de 50/50, pérdidas por inserción de 3.1 dB y un exceso de pérdidas de 0.1 dB.

Acoplador biconico n°3.

Tabla 12. Parámetros para la fabricación del acoplador biconico n°3.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3 mm
Diámetro de cintura D_c	35 μ m
Tiempo	91 s
Voltaje de entrada	7.4 mV
Voltaje Puerto 3	3.5 mV
Voltaje Puerto 4	3.6 mV

Se realiza los cálculos respectivos para hallar la razón de acoplamiento, pérdida por inserción y el exceso de pérdidas.

Reemplazando los datos mencionados en la tabla 12, obtenemos:

$$R(\%) = \frac{3.6}{3.6 + 3.5} \times 100 = 51$$

$$R(\%) = \frac{3.5}{3.6 + 3.5} \times 100 = 49$$

$$\text{Perdidas por insercion (dB)} = 10 \log \frac{7.4}{3.6} = 3.1 \text{ dB}$$

$$\text{Exceso de perdidas (dB)} = 10 \log \frac{7.4}{3.5 + 3.6} = 0.1 \text{ dB}$$

Se muestra a continuación la potencia normalizada transmitida durante el proceso de adelgazamiento del acoplador n°3 cuyo diámetro final de cintura fue de 35µm.

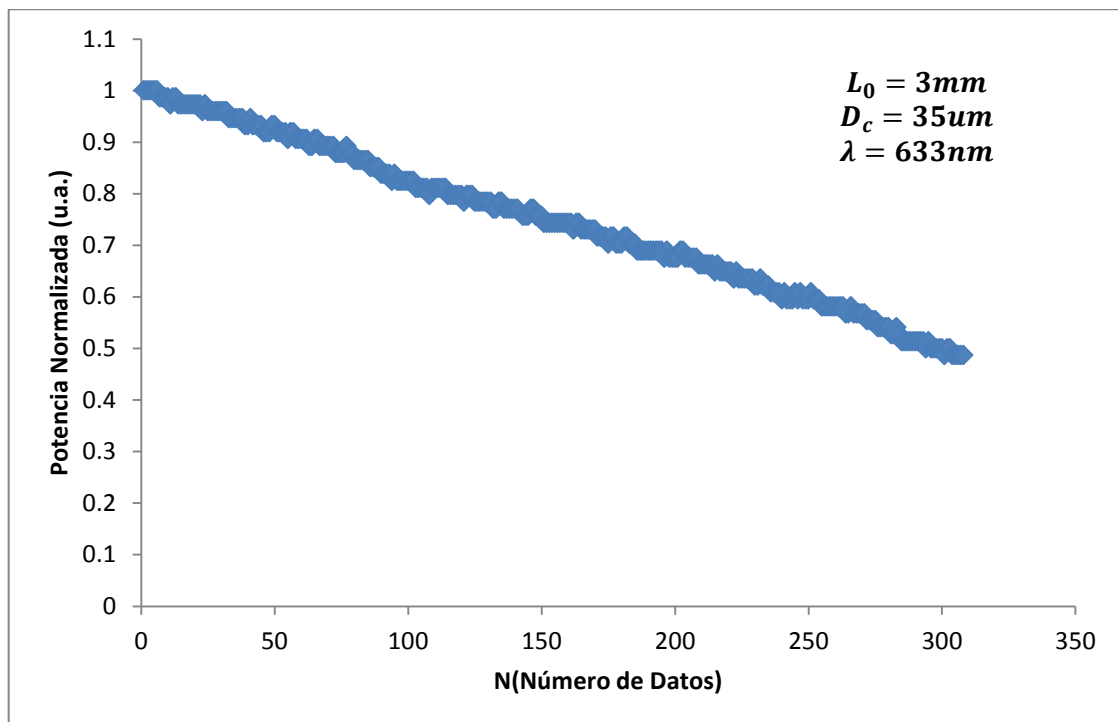


Figura 30. Potencia Normalizada vs N (Número de Datos) del acoplador n°3 con $D_c = 35\mu\text{m}$.

Mediante el análisis de la gráfica se muestra el comportamiento de la transmisión de potencia, se logra observar que el acoplador presenta una suave disminución progresiva de la potencia durante casi todo el proceso de adelgazamiento. Con la fabricación del

acoplador se logró alcanzar una razón de acoplamiento de 51/49, pérdidas por inserción de 3.1 dB y un exceso de pérdidas de 0.1 dB.

Los acopladores fabricados bajo la técnica de tracción de fibra, presentan pérdidas por inserción < 3.5 dB, debido a que durante la fabricación y posterior medición de los acopladores, se tuvo la precaución de realizar exactamente el procedimiento de igual forma en cada caso. Se logra alcanzar razones de acoplamiento según nuestras necesidades.

En la figura que se presenta a continuación se muestra los tres acopladores fabricados con el sistema eléctrico-mecánico en el laboratorio de óptica fotónica.

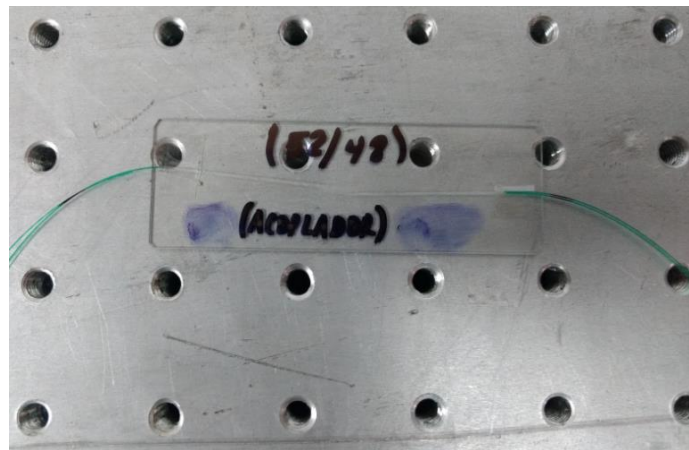




Figura 31. Acopladores fabricados con razón de acoplamiento (52/48, 50/50, 51/49) en el laboratorio de óptica fotónica.

Debe señalarse que se fabricaron otros acopladores con diferentes razones de acoplamiento para obtener una comparación más precisa, sin embargo, debido a inconvenientes solo se logró establecer la comparación entre estos tres acopladores. A continuación, se muestra los otros acopladores fabricados con sus respectivas razones de acoplamiento, pérdidas por absorción y exceso de pérdidas.

Tabla 13. Parámetros para la fabricación del acoplador n°4.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3.0 mm
Diámetro de cintura D_c	35 μ m
Tiempo	91 s
Voltaje de entrada	9.8 mV
Voltaje Puerto 3	3.9 mV
Voltaje Puerto 4	5.7 mV

$$R(\%) = \frac{5.7}{3.9 + 5.7} \times 100 = 60$$

$$R(\%) = \frac{3.9}{3.9 + 5.7} \times 100 = 40$$

$$\text{Perdidas por insercion (dB)} = 10\log \frac{9.8}{5.7} = 2.4 \text{ dB}$$

$$\text{Exceso de perdidas (dB)} = 10\log \frac{9.8}{3.9 + 5.7} = 0.08 \text{ dB}$$

Tabla 14. Parámetros para la fabricación del acoplador n°5.

Parámetros	Valor
Zona de calentamiento L_0	3.0 mm
Diámetro de cintura D_c	35 μ m
Tiempo	91 s
Voltaje de entrada	9.5 mV
Voltaje Puerto 3	1.9 mV
Voltaje Puerto 4	7.5 mV

$$R(\%) = \frac{7.5}{1.9 + 7.5} \times 100 = 80$$

$$R(\%) = \frac{1.9}{1.9 + 7.5} \times 100 = 20$$

$$\text{Perdidas por insercion (dB)} = 10\log \frac{9.5}{7.5} = 1.02 \text{ dB}$$

$$\text{Exceso de perdidas (dB)} = 10\log \frac{9.5}{1.9 + 7.5} = 0.04 \text{ dB}$$

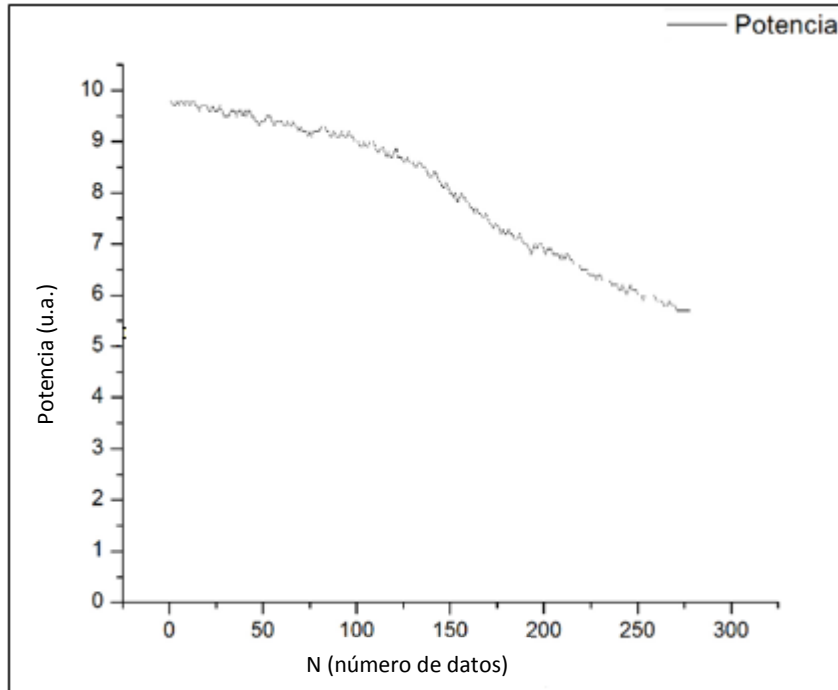


Figura 32. Trasmisión de potencia del acoplador de razón de acoplamiento (60/40).

4.3 Resultados del Interferómetro de Mach-Zehnder modificado.

Se muestra el resultado obtenido luego de varios intentos experimentales con el Interferómetro de Mach-Zehnder modificado construido con el acoplador de razón de acoplamiento de 50/50 que reemplazo tres elementos ópticos, lo cual disminuye el costo del interferómetro de Mach-Zehnder.

A continuación, se muestra en la figura 33 el patrón de interferencia obtenido con el interferómetro de Mach-Zehnder modificado:

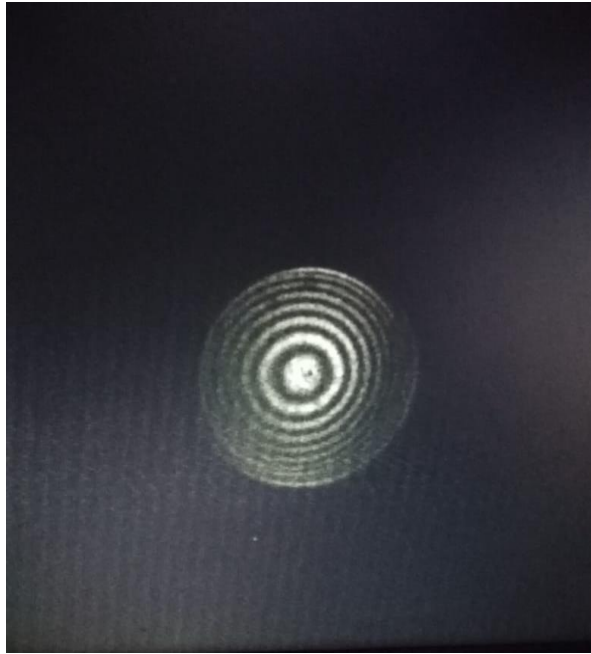


Figura 33. Patrón obtenido con el Interferómetro con el acoplador de 50/50.

En el patrón de interferencia obtenido se observa de manera nítida anillos concéntricos de interferencia en un gran número, los cuales no presentan distorsión alguna; esto nos muestra que los acopladores fabricados mediante el sistema electro-mecánico son adecuados y confiables para su uso.

5 CONCLUSIONES.

Las conclusiones principales de este trabajo de tesis se presentan a continuación.

- Se diseñó una metodología correcta para la fabricación que permitió repetir adecuadamente el proceso de fabricación de los *tapers*, así como de los acopladores biconicos.
- Se comprobó experimentalmente que con una zona de calentamiento constante las relaciones entre los diámetros de los *tapers* cumplen con la formula exponencial indicando así la relación que guarda el cuello del *taper* con la extensión total del mismo.
- Los acopladores fabricados fueron analizados y comparados entre sí a partir de lo cual se logró una importante información para una futura optimización del proceso de fabricación.
- Se logró fabricar acopladores biconicos con pérdidas por inserción de hasta los 2.9 dB y un exceso de pérdidas de 0.1 dB, lo cual confirma su buena fabricación con el equipo construido en la facultad de Ciencias-UNI.
- Se logró alcanzar nítidamente anillos de interferencia de manera concéntrica y en un gran número, los cuales no presentan distorsión alguna. Esto nos confirma e indican que los acopladores fabricados son adecuados y confiables.
- Los resultados pueden optimizarse tanto en la fabricación de los *tapers* como de los acopladores. Para esto es necesario contar con un mejor sistema de estirado, como también en la incidencia del haz de luz a uno de los extremos de la fibra ya que no se cuenta con un sistema adecuado para tal fin, al igual que el proceso de extracción del *taper* o acoplador hacia el portaobjetos, ya que resulta fundamental la protección para mantener la integridad de estos.

REFERENCIAS

- [1] J. B. Rivero, «Fibra óptica como medio de transmisión», *Tono Rev. técnica la Empres. Telecomunicaciones Cuba S.A*, pp. 44-48, 2004.
- [2] S. M. García, «Adelgazamiento de fibra óptica monomodo de sílice y su caracterización espectral», Instituto Politecnico Nacional, 2015.
- [3] A. Ghatak y K.Thyagarajan, *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge. 1998.
- [4] R. Duchowicz y S. Noriega, *Intercomunicador por fibra óptica*. Buenos Aires, Argentina, 2005.
- [5] G. Cárdenas Sevilla, «Caracterización de Rejillas de Periodo Largo inducidas Mecánicamente en Fibras Opticas Adelgazadas.», Centro de Investigaciones en Óptica A.C., 2008.
- [6] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications Principles and Practice*, 3.^a ed. 2009.
- [7] E. A. A. Reyna, «Análisis de Guías de Onda Ópticas y Dispositivos de Óptica Integrada Mediante Simulaciones», Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2007.
- [8] M. Bayoumi y W.-K. Chen, *The Electrical Engineering Handbook*. 2005.
- [9] «Guías De Onda», *Aplicaciones de Optoelectrónica en Medicina*. pp. 1-16, 2010.
- [10] S. Martín-Lopez, «Generación de supercontinuo en fibras ópticas monomodo con fuentes de bombeo continuo», Universidad Complutense de Madrid, 2006.
- [11] «Modos Guiados en Fibras Ópticas», 2007, p. 27.
- [12] E. Sanchis y J.B. Ejea, «Propagación de la luz en guías de onda», pp. 1-65, 2008.
- [13] R. C. Martínez, «Interferómetros de fibra óptica con barrido en longitud de onda como sensores de alta sensibilidad», Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 2000.
- [14] K. Kawano y T. Kitoh, *Introduction to optical waveguide analysis: solving*

Maxwell's equations and ..., vol. 1. 2001.

- [15] F. J. Arregui, I. R. Matias, C. Barriain, y M. Lopez-Amo, «Experimental design rules for implementing biconically tapered single mode optical fibre displacement sensors», *Eur. Work. Opt. Fibre Sensors - SPIE Proc.*, vol. 3483, n.º May 2010, pp. 164-168, 1998.
- [16] F. J. Arregui, I. R. Matías, y M. López-Amo, «Optical fiber strain gauge based on a tapered single-mode fiber», *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 79, n.º 2, pp. 90-96, 2000.
- [17] L. C. Bobb y P. M. Shankar, «Tapered optical fiber components and sensors», 1992.
- [18] C. Barriain, I. R. Matias, F. J. Arregui, y M. Lopez-Amo, «Experimental results toward development of humidity sensors by using a hygroscopic material on biconically tapered optical fiber», *Photonics China '98*, vol. 3555, pp. 95-105, 1998.
- [19] S. Lacroix, R. J. Black, C. Veilleux, y J. Lapierre, «Tapered single-mode fibers: External refractive-index dependence», *Appl. Opt.*, vol. 25, n.º 15, pp. 2468-2469, 1986.
- [20] G. Brambilla *et al.*, «Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications», *Adv. Opt. Photonics*, vol. 1, n.º 1, p. 107, 2009.
- [21] R. R. Gattass, G. T. Svacha, L. Tong, y E. Mazur, «Supercontinuum generation in submicrometer diameter silica fibers», *Opt. Express*, vol. 14, n.º 20, p. 9408, 2006.
- [22] S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. S. J. Russell, y M. W. Mason, «Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides», *Opt. Express*, vol. 12, n.º 13, p. 2864, 2004.
- [23] M. Eisenmann y E. Weidel, «Single-mode Fused Biconical Coupler for Wavelength Division Multiplexing with Channel Spacing between 10 and 30 nm», *J. Light. Technol.*, vol. 6, n.º 1, pp. 113-119, 1988.
- [24] J. C. Crano y R. J. Guglielmetti, *Organic Photochromic and Thermochromic Compounds*. 2002.

- [25] R. Gravina, G. Testa, y R. Bernini, «Perfluorinated plastic optical fiber tapers for evanescent wave sensing», *Sensors*, vol. 9, n.º 12, pp. 10423-10433, 2009.
- [26] N. Díaz Herrera, «Desarrollo de Sensores de Fibra Óptica Para el Control “In-Situ” de Parámetros Físicos del Medio Acuático», Universidad Complutense de Madrid, 2005.
- [27] A. M. Morales y C. M. Lieber, «A Laser Ablation Method for the Synthesis of Crystalline Semiconductor Nanowires», *Science (80-.)*, vol. 279, n.º 5348, pp. 208-211, 1995.
- [28] J. Westwater, D. P. Gosain, S. Tomiya, S. Usui, y H. Ruda, «Growth of silicon nanowires via gold/silane vapor–liquid–solid reaction», *J. Vac. Sci. Technol. B 15*, vol. 15, pp. 554-557, 1997.
- [29] S. W. Harun, K. S. Lim, A. A. Jasim, y H. Ahmad, «Fabrication of optical comb filter using tapered fiber based ring resonator», vol. 20, n.º 7, p. 774303, 2010.
- [30] H. J. Khashi, «Fabrication of Submicron-Diameter and Taper Fibers Using Chemical Etching», *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 28, n.º 4, pp. 308-312, 2012.
- [31] K. Okamoto, *Fundamentals of optical waveguides*, 2.^a ed. Japon, 2006.
- [32] «All-Fiber Source of Broadband Light With Modulated Spectrum Based on Twin-Core Fiber», *J. Light. Technol.*, vol. 34, n.º 13, pp. 3126-3130, 2016.
- [33] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, y R. G. Lamont, «Biconical-taper single-mode fiber coupler», *Opt. Lett.*, vol. 6, n.º 7, p. 327, 1981.
- [34] «Fabricación y caracterización de fibras ópticas adelgazadas y acopladores de fibra óptica».
- [35] K. Morishita y K. Takashima, «J. Lightwave Technol», vol. 9, p. 1503, 1991.
- [36] C. W. Wu y H. . Chang, «IEEE Photonic», vol. 7, p. 786, 1995.
- [37] M. S. Yataki, D. N. Payne, y M. P. Varnham, *Electron Lett.* 1985.

- [38] X. Fan, W. Zhou, S. Wang, X. Liu, W. Y. y D. Shen, «Appl. Opt.», vol. 55, p. 3319, 2016.
- [39] Y. Chen, Y. Semenova, G. Farrell, F. Xu, y Y.-Q. Lu, «IEEE Photon Technol», vol. 27, p. 2579, 2015.
- [40] M. V. Hernandez-Arriaga, M. Bello-Jimenéz, A. Rodríguez-Cobos, y M. V. Andrés, «IEEE Sens», vol. 16, p. 132, 2016.
- [41] M. V. Hernández-Arriaga, M. Bello-Jimenéz, A. Rodríguez-Cobos, R. López-Estopier, y M. V. Andrés, «IEEE Sens», vol. 17, p. 333, 2017.
- [42] M. Eisenmann y E. Weidel, «J. Lightwave Technol», vol. 6, p. 113, 1988.
- [43] M. N. Mc Landrich, R. J. Orazi, y H. R. Marlin, «J. Lightwave Technol», vol. 9, p. 442, 1991.
- [44] A. Hardy y W. Streifer, *Coupled-mode theory of parallel waveguides*. 1985.
- [45] B. E. A. Saleh, *Fundamentals of photonics*. 2007.
- [46] D. Marcuse, *The coupling of degenerate modes in two parallel dielectric waveguides*. 1971.
- [47] G. Romo Cardenas, «Desarrollo de prototipado de interferómetro de Mach-Zehnder para la caracterización de fluidos y biocombustible».
- [48] I. Suárez, P. Pernas, y G. Lifante, «Fabricación , caracterización y modelado de interferómetros Mach-Zehnder integrados en guías de onda de LiNbO₃ : Zn», *Sensors And Actuators*, vol. 82, n.º 2000, pp. 149-154, 2010.
- [49] A. Flores, M. Flores, K. Karremans, y B. Zuidberg, «Undergraduate experiments in optics employing a fiber optic version of the Mach-Zehnder interferometer», *Seventh Int. Conf. Educ. Train. Opt. Photonics*, vol. 4588, p. 464, 2002.
- [50] T. A. Birks y Y. W. Li, «The Shape of Fiber Tapers», *J. Light. Technol.*, vol. 10, n.º 4, pp. 432-438, 1992.

