



Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

División de Fotónica

Loma del Bosque 115, León, Guanajuato, 37150, México

Fabricación e Investigación de Fibras de Cristal Fotónico (Microestructuradas) con Núcleo de Gran Área

por

Marcelo Vaca Pereira Ghirghi

Tesis presentada como cumplimiento parcial de los requisitos para
obtener el grado de Maestro en Ciencias (Óptica).

Asesor:

Dr. Uladzimir Petrovich Minkovich

8 de agosto de 2012

Fabricación e Investigación de Fibras de Cristal
Fotónico (Microestructuradas) con
Núcleo de Gran Área

por

Marcelo Vaca Pereira Ghirghi

Aprobada por:

Dr. Uladzimir P. Minkovich
Asesor de Tesis

Dr. David Monzón Hernandez
Sinodal

Dr. Sergio Calixto Carrera
Sinodal

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
8 de agosto de 2012

Estoy absolutamente convencido de que la ciencia y la paz triunfarán sobre la ignorancia y la guerra, que las naciones se unirán a la larga no para destruir sino para edificar, y que el futuro pertenece a aquellos que han hecho mucho por el bien de la humanidad.

Louis Pasteur

RESUMEN

En esta tesis se expone paso a paso el proceso de fabricación de una fibra de cristal fotónico (PCF). El objetivo principal de este trabajo es el de diseñar y fabricar una PCF (microestructurada) con núcleo de gran área (LMA).

Este diseño se basa en el método de los parámetros V y W – los capilares y barras para realizar la preforma se fabrican usando el mismo método. Se realizó el estiramiento de la preforma para obtener la fibra diseñada y se tomaron varias medidas, como son las dimensiones geométricas, la apertura numérica y la atenuación. Estos valores se comparan con los del cálculo del método V y W .

Este es el primer trabajo elaborado en México donde se fabrica una PCF en base a un método específico de diseño y con resultados experimentales muy cercanos a la teoría.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada quiero expresar mi profundo agradecimiento al CIO y a la grandiosa institución que es el CONACYT por todo el apoyo durante estos dos años de maestría. Ante todo agradezco también a mi asesor, el Dr. Uladzimir Petrovich Minkovich, quien ha tenido mucha paciencia y dedicación en mi enseñanza tanto de las materias, como de la elaboración de mi tesis. Siempre ha mostrando su total profesionalismo y dedicación a su tema de investigación.

También quiero expresar mis agradecimientos a mis compañeros del CIO, particularmente a Sean Anderson, Ramsés Salazar y Camilo Estrada por su ayuda en la parte de los programas y simulaciones.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis familiares, que siempre me han dado su apoyo y comprensión en cada una de mis desiciones.

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

PCF	Fibra de cristal fotónico
LMA	Núcleo de gran área
MFA	Microscopio de fuerza atómica
HNL	Gran no-linealidad
NA	Apertura numérica
HNA	Gran apertura numérica
LIC	Núcleo con bajo índice de refracción
BG	Fibra de Bragg
AG	Núcleo de aire
HC	Núcleo hueco
MFD	Diámetro del campo modal
UV	Ultravioleta
FEM	Método de los elementos finitos
SIFA	Fibra convencional o escalonada

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción a las Fibras de Cristal Fotónico	1
1.1. De las Fibras Convencionales a las Fibras de Cristal Fotónico	1
1.2. Pérdidas en las Fibras	2
1.2.1. Pérdidas por Absorción	2
1.2.2. Pérdidas por Doblado	3
1.2.3. No Linealidad	3
1.2.4. Modos	4
1.3. Dispersión en las Fibras	4
1.4. Fibras de Cristal Fotónico	5
1.5. Diferentes Tipos de Fibra de Cristal Fotónico	7
1.6. Fabricación de las PCF	10
1.7. Fabricación de las Preformas de las PCF	13
1.8. Estiramiento de las PCF	15
1.9. Índice de Refracción Efectivo	15
1.10. Características de la LMA PCF	17
1.11. Parámetros Principales en la Descripción del Gran Área Trans- versal del Núcleo en las PCF	20
1.12. Limitaciones de las PCF en Nuevas Tec. y Telecom.	21
1.13. Diseño de las LMA PCF	22
1.14. Seguridad en el Laboratorio de Estiramiento de Fibras Ópticas	23
Bibliografía	28
2. Fórmulas para el diseño de las PCF	31
2.1. La Expresión para el Parámetro V	32
2.2. La Expresión para el Parámetro W	35
2.3. Resultados Numéricos	41
Bibliografía	46
3. Estiramiento de las Fibras de Cristal Fotónico	47
3.1. Diseño de la Fibra	47
3.2. Programa para Diseñar Fibras Ópticas de Cristal Fotónico . .	51
3.3. Fabricación de Capilares y Barras Cilíndricas de Relleno . . .	53
3.4. Apilamiento de los Capilares y las Barras	54

4. Resultados, Mediciones y Análisis de la PCF	58
4.1. Resultados	58
4.2. Dimensiones Geométricas de las Fibras Fabricadas	59
4.3. Medición de la Apertura Numérica	62
4.4. Medición y Análisis de los Resultados de Atenuación	66
4.4.1. Niveles de Atenuación Reportados	66
4.4.2. Contaminación del Vidrio de Silice con OH	66
4.4.3. Resultados de Atenuación de las Fibras Fabricadas en el CIO	67
Bibliografía	72
5. Conclusión	73
A. Programa para Graficar Parámetros PCF (Mathematica)	77
B. Cálculo de Parámetros PCF (Mathematica)	79
C. Cálculo de λ para Dispersión Cero (Mathematica)	80
D. Cálculo del Pitch en Base a Lambda (Mathematica)	81
E. Programa para Diseño de PCF (Matlab)	82
Vita	84

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Refracción, ángulo crítico y reflexión interna total	2
1.2. Fibra de cristal fotónico, la fotografía es gentileza de Crystal Fibers A/S	6
1.3. Fibra de cristal fotónico con núcleo de aire, la fotografía es gentileza de Optical Fibers A/S	9
1.4. Horno para el estiramiento de fibras ópticas	12
1.5. Tambor donde se enrolla la fibra	13
1.6. Micrografía electrónica de barrido de la fase final de una fibra de cristal fotónico que tiene numerosos agujeros pequeños que se han mantenido abiertos después de la elaboración de la fibra. La fotografía es gentileza de Cristal A/S	14
1.7. Fabricación de una fibra de cristal fotónico: a) creación de los capilares individuales, b) formación de la preforma, c) estiramiento de la preforma intermedia, d)estiramiento final de la fibra	15
1.8. Imagen que ilustra cómo las dimensiones exteriores de la preforma se reducen para formar la fibra de cristal fotónico. . . .	16
1.9. Fibra de cristal fotónico (o microestructurada) con cavidades triangulares, la fotografía es gentileza de Optical Fibers A/S	18
1.10. Sección transversal de: a) una fibra con núcleo dopado y doble revestimiento, b) una fibra de cristal fotónico, donde el núcleo activo está envuelto por agujeros de aire. La fotografía es gentileza de Optical Fibers A/S	19
1.11. Modelos de fibras de cristal fotónico (microestructuradas): a) sin agujero de aire en el centro, b) con agujero de aire en el centro	23
1.12. Preforma a alta temperatura (1900 grados centígrados) en proceso de fabricación	24
1.13. Pieza móvil que regula el movimiento de la preforma dentro del horno de la torre de estiramiento	25
1.14. Quemadura a consecuencia del contacto de la piel con el vidrio o con una pieza metálica	26
1.15. Mecanismo que enrolla la fibra en el tambor	26

1.16. Escaleras de la torre de estiramiento de fibras	27
2.1. Relación del parámetro V con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ (desde 0.1 hasta 0.8)	33
2.2. Índice de refracción efectivo de la envoltura con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ que van desde 0.1 hasta 0.8	35
2.3. Relación del parámetro W con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ (desde 0.1 hasta 0.8)	37
2.4. Índice de refracción efectivo de la envoltura con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ	38
2.5. Dispersión cromática en función de la longitud de onda. Las líneas continuas indican los resultados de este método y las punteadas del método de los elementos finitos	39
2.6. Datos de la relación de λ/Λ con respecto a d/Λ , para encontrar las zonas monomodo y multimodo	40
2.7. Gráfico de dispersión para una PCF de cuatro capas, la longitud de onda para la cual se tiene cero dispersión es de 1.2433 micrómetros	44
2.8. Gráfico de la dispersión para una PCF de cinco capas, la longitud de onda para la cual se tiene cero dispersión es de 1.2302 micrómetros	45
3.1. Diseño de la fibra óptica de cristal fotónico de cuatro capas	48
3.2. Diseño de la fibra óptica de cristal fotónico de cinco capas	49
3.3. Capilares que exceden el límite interior de la preforma	50
3.4. Forma geométrica para diseñar una posible barra entre los capilares	50
3.5. Barras de diferentes diámetros para rellenar los espacios libres	51
3.6. Diseño de una fibra de cuatro capas, elaborado automáticamente por el programa Matlab	52
3.7. Diseño de una fibra de cinco capas, elaborado automáticamente por el programa Matlab	53
3.8. Mecanismo especial, donde se acomodan los capilares	55
3.9. Capilares acomodados en el mecanismo especial, formando exágonos concéntricos alrededor del núcleo	55
3.10. Fotografía de los capilares y las barras, listos para introducirse en la preforma. cristal fotónico	56
3.11. Fotografía de los capilares y las barras acomodados en el interior de una preforma, en base al diseño de la fibra de cristal fotónico	57

4.1. Corte transversal de la Fibra de Cristal Fotónico con núcleo de gran área, fabricada en el CIO, vista bajo microscopio con objetivo de 40x	60
4.2. Información otorgada por el MFA	61
4.3. Arreglo para realizar la medición del ángulo de salida de la fibra	62
4.4. Función Gaussiana obtenida de la fibra N6, en los ejes X y Y respectivamente	63
4.5. Función Gaussiana obtenida de la fibra N10, en los ejes X y Y respectivamente	64
4.6. Función Gaussiana obtenida de la fibra N7, en los ejes X y Y respectivamente	65
4.7. Función Gaussiana obtenida de la fibra N9, en los ejes X y Y respectivamente	66
4.8. Fotografía tomada del haz de salida de una de las fibras de cristal fotónico fabricadas en el CIO	67
4.9. Gráfico de la atenuación de la fibra N6	69
4.10. Gráfico de la atenuación de la fibra N10	70
4.11. Gráfico de la atenuación de la fibra N7	70
4.12. Gráfico de la atenuación de la fibra N9	71
4.13. Gráfico de la atenuación de las cuatro fibras juntas	71

ÍNDICE DE CUADROS

2.1. Coeficiente para encontrar el parámetro V.	34
2.2. Coeficiente para encontrar el parámetro W.	36
2.3. Resultados del cálculo de la primera fibra	42
2.4. Resultados de los cálculos de ángulo de divergencia para la primera fibra	42
2.5. Resultados del cálculo de la segunda fibra	42
2.6. Resultados de los cálculos de ángulo de divergencia para la segunda fibra	43
3.1. Dimensiones de la preforma para la primera y la segunda PCF. Unidades son mm en donde aplican.	49
3.2. Datos del diámetro y cantidad de barras para la fibra de cua- tro capas	51
3.3. Datos del diámetro y cantidad de barras para la fibra de cinco capas	52
4.1. Parámetros de fabricación de las cuatro fibras	59
4.2. Valores geométricos de las 4 PCF fabricadas. Unidades en μm	61
4.3. Valores del ángulo del cono de entrada de la fibra y de la apertura numérica	64
4.4. Comparación de los valores de resultados por cálculos y re- sultados obtenidos en la medición del ángulo del cono de luz de las PCF y de la apertura numérica	65

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LAS FIBRAS DE CRISTAL FOTÓNICO

1.1. De las Fibras Convencionales a las Fibras de Cristal Fotónico

La fibra óptica, cuya capacidad de transmitir información a largas distancias con una velocidad excepcional, es uno de los mayores éxitos tecnológicos del siglo XX [1].

Las fibras ópticas, que se utilizan principalmente en sistemas de telecomunicaciones, son filamentos delgados y flexibles fabricados de materiales dieléctricos como vidrio o polímero con aproximadamente el grosor de un cabello humano.

Se utilizan principalmente para transmitir la luz de un lugar a otro de la misma manera que los cables de cobre llevan señales eléctricas y energía. Las fibras juegan un papel importante también en algunos sistemas láseres industriales, equipos médicos y en los diferentes dispositivos de detección, como son los sensores.

La fibra óptica convencional o tradicional, que se usa comúnmente en las telecomunicaciones consta de dos capas diferentes de sílice (vidrio común): un núcleo interno al que se le adicionan pequeñas cantidades de un material (por lo general de germanio), y un revestimiento exterior de sílice puro que envuelve al núcleo.

Los dopantes como el germanio elevan el índice de refracción del núcleo. Esta diferencia en el índice de refracción hace que la radiación electromagnética se mantenga en el núcleo a través de un proceso conocido como reflexión interna total. De esta manera, la luz se canaliza hacia el centro, y sólo sale cuando llega al extremo de la fibra [2, 3].

Las múltiples reflexiones, que mantienen la luz confinada en el interior de la fibra, se producen en la frontera entre el núcleo y el revestimiento, y la condición de confinamiento se rompe solamente en el caso que el ángulo de incidencia de los rayos sea menor al ángulo crítico. El Valor del ángulo crítico se puede obtener a partir de la ley de Snell, en la figura 1.1 se ilustran tres rayos con diferentes ángulos de incidencia, donde se puede observar: la refracción, el ángulo crítico y la reflexión interna total [4, 5].

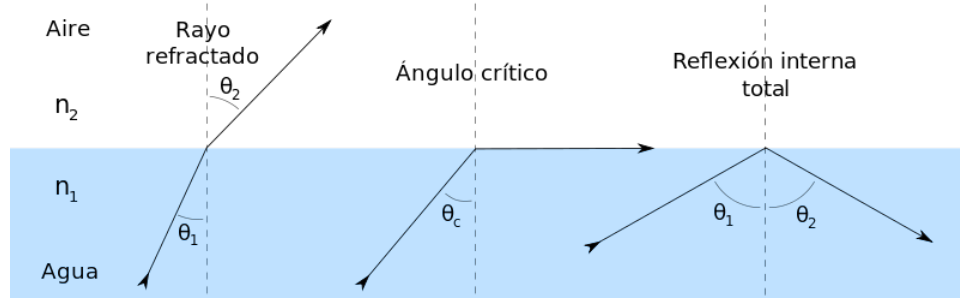


Figura 1.1: Refracción, ángulo crítico y reflexión interna total

1.2. Pérdidas en las Fibras

Las pérdidas en cualquier sistema se definen como la relación entre la energía que entra a un sistema y la energía que sale de este sistema, en el caso de las fibras ópticas también existen pérdidas en todas las fibras existentes, y existen varios tipos de pérdidas, como las que se mencionan a continuación.

1.2.1. Pérdidas por Absorción

Las pérdidas por absorción en las fibras ópticas convencionales fabricadas de sílice puro, para longitudes de ondas que van desde los $0.8 \mu\text{m}$ hasta los $1.8 \mu\text{m}$, son muy bajas, y teóricamente la radiación electromagnética a esta longitud de onda puede recorrer cientos de kilómetros sin sufrir una pérdida notable.

Sin embargo hasta los años 70 del siglo pasado las pérdidas por absorción eran considerables, debido a la impureza del material, el cual podía contener agua y algunos metales junto con el Sílice.

El trabajo mostrado por Keck y otros autores [6] permitió fabricar fibras cuya absorción es muy baja y en consecuencia las pérdidas también son bajas.

Este tipo de fibras puede tener coeficientes de absorción tales como 0.18 dB/km a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$, permitiendo que la información se transmita sin amplificación por cientos de kilómetros.

Claro que para las redes intercontinentales, se debe utilizar una fibra con la menor atenuación posible y para compensar estas pérdidas se instalan repetidoras (amplificadoras) cada cierta distancia, la cual ya está precalculada.

1.2.2. Pérdidas por Doblado

Existen pérdidas en las fibras que se dan por el doblado de la misma.

El origen de las pérdidas por doblado se explica a continuación: En una fibra sin doblar los rayos que inciden con el mayor ángulo de incidencia para el cual aún se da la reflexión interna total llegan hasta el final de la fibra sin salirse de ella, en una fibra con doblado, estos rayos se salen de la fibra justamente en la curvatura, haciendo que tenga mayores pérdidas las fibras mientras mayor sea la curvatura (mientras más cerrada sea) [7].

1.2.3. No Linealidad

El efecto óptico no lineal aparece cuando la densidad de energía de la radiación electromagnética (luz) es bastante grande, independientemente del material.

Dado que la luz en las fibras ópticas está confinada en un núcleo muy estrecho, los efectos no lineales pueden aparecer incluso en el sílice debido a que la intensidad de energía por unidad de área es alta aún a baja potencia inyectada a estas.

Estos efectos normalmente son una molestia para las redes de comunicaciones de largas distancias, pero también pueden convertirse en aplicaciones útiles, como por ejemplo para generar el supercontinuo (el cual se mencionará más adelante) en las fibras de cristal fotónico.

1.2.4. Modos

El comportamiento multimodal es no deseado ya que cada modo viaja a diferente velocidad a lo largo de la fibra, ocasionando que un pulso de luz bien definido que ingrese a la guía de onda, tras propagarse a lo largo de una distancia considerable, resulte dispersado a causa del retraso relativo entre los diversos modos que lo componen. A este efecto se le conoce como dispersión modal.

Y como se había mencionado antes, si consideramos el caso en el que solamente se propaga el modo fundamental, nos encontramos con una circunstancia similar, puesto que el rango de longitudes de onda del que espectralmente esta compuesto un pulso de luz, da origen a la “dispersión cromática” en razón al retraso relativo que experimentan las diferentes ondas que lo integran.

Este comportamiento de la dispersión, así como muchas otras características de las fibras convencionales, han venido siendo replanteadas con el desarrollo de las fibras de cristal fotónico (PCF), con las cuales se han obtenido importantes avances, tanto en el terreno de las telecomunicaciones como en otros campos diferentes .

1.3. Dispersión en las Fibras

En los sistemas de telecomunicación, la información se transmite en datos binarios, que consisten en pulsos ópticos.

En el campo de las guías de onda la dispersión es una de las características más importantes para la correcta transmisión de los datos.

Existen 4 causas esenciales de dispersión:

La dispersión intermodal: esta solo ocurre en las fibras multimodos y se trata de la diferencia de propagación en los diferentes modos. El valor de dispersión depende de la longitud de propagación.

La dispersión material: esta es la principal, ya que depende intrínsecamente del material. Espectralmente un pulso de luz está compuesto por un rango de frecuencias, que se encuentran alrededor de la frecuencia de modulación de la fuente, y en base al material cada componente espectral se propagará a diferentes velocidades, dicho en otras palabras,

para cada longitud de onda el material tiene un diferente índice de refracción, lo que en óptica instrumental se denomina como aberración cromática.

Dispersión de la guía de onda: incluso para materiales sin dispersión, las soluciones a las ecuaciones de propagación dependen de la longitud de onda: La constante de propagación del modo tomado depende de la longitud de onda. Esto conduce a una propagación del pulso y a una deformación del mismo por estas mismas razones.

Dispersión del modo de polarización: que es en hecho el mismo fenómeno que ocurre en la dispersión intermodal, pero los modos relevantes son aquí originalmente degenerados. Se puede observar que en la fibra monomodo se tiene dos modos degenerados [8].

1.4. Fibras de Cristal Fotónico

Una variedad reciente de fibras, es la fibra de cristal fotónico, la cual tiene una serie de ventajas con respecto a una fibra convencional.

La investigación de fibras de cristal fotónico comenzó con los primeros experimentos [9], que demostraron que la luz puede ser guiada por una fibra de cristal fotónico, primeramente por reflexión total interna y después por la teoría fotónica de la zona prohibida o bandgap. Ahora que las bases de este campo están bien definidas, los expertos han enfocado su investigación en el desarrollo y en las aplicaciones de las PCF.

En la década de los 90 se fabricó por primera vez una fibra microestructurada (o de cristal fotónico), en el año 1995 fue reportada la primera fibra estructurada con orificios periódicos alrededor del núcleo en la Universidad de Southampton (Inglaterra), a la cual Philip Russel con su grupo de ayuda le asignaron el nombre de fibra de cristal fotónico [9], debido a la similitud con el efecto fotónico del band gap (o zona prohibida) en los cristales.

Existe bastante similitud entre un semiconductor y una fibra micro estructurada, ya que en ambos casos, la distribución periódica del potencial causa la apertura o prohibición en la relación de dispersión para una onda de un fotón o de un electrón [10, 11].

En la Figura 1.2 se puede observar una fibra de cristal fotónico (o microestructurada).

Para algunas aplicaciones, es deseable el uso de fibra óptica con núcleo grande o grandes áreas efectivas (fibras LMA) – las cuales normalmente son monomodo.

Debido a la intensidad óptica reducida, estas fibras tienen una menor eficacia no lineal y un umbral de daño mayor, lo que las hace adecuadas para, por ejemplo, la amplificación de pulsos intensos o señales de una sola frecuencia en los amplificadores de fibra, o en el caso de las fibras pasivas para la entrega de luz, con alta potencia, mientras que el de las fibras monomodo tiene un área efectiva por debajo de $100 \mu\text{m}^2$, las fibras con núcleo de gran área alcanza valores de cientos o incluso miles de μm^2 .

Para lograr una fibra monomodo con un área relativamente grande, hay varios enfoques de diseño más refinado, con perfiles optimizados del índice de refracción, en los que las áreas son del orden de los $1000 \mu\text{m}^2$.

Este es un orden de magnitud superior al de las fibras monomodo convencionales.

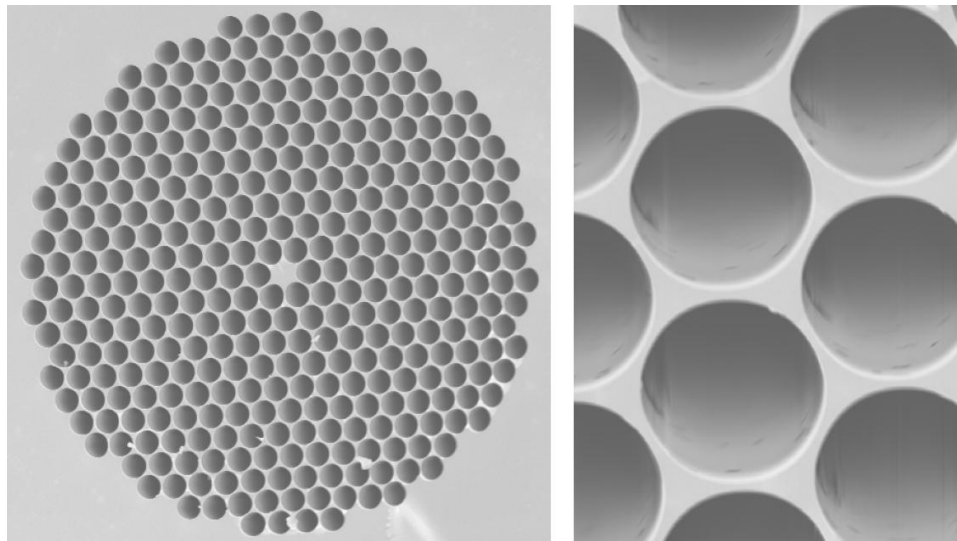


Figura 1.2: Fibra de cristal fotónico, la fotografía es gentileza de Crystal Fibers A/S

Una de las ventajas importantes que tiene la fibra de cristal fotónico con respecto a la fibra convencional es la alta flexibilidad del diseño, es decir que cambiando parámetros geométricos como son: la dimensión del diámetro de los orificios o la distancia de separación entre ellos es posible obtener fibras con propiedades ópticas diversas.

Una de las desventajas de este tipo de fibras es la atenuación, la cual aún es mayor que en la fibra convencional.

Russel explicó las diversas particularidades de la fibra de cristal fotónico de mantener un solo modo, estas particularidades se deben a los orificios de aire también actúan como si fuesen un “colador”. Los orificios de aire también actúan como si fuesen barreras poderosas [9].

Se puede hacer todo con un solo tipo de vidrio (o polímero), ya que no dependen de dopantes para su orientación, sino que una región de esta fibra cuenta con un revestimiento con muchos agujeros de aire pequeños a lo largo de la fibra, y alrededor del núcleo.

1.5. Diferentes Tipos de Fibra de Cristal Fotónico

Las fibras de cristal fotónico (PCF por sus siglas en inglés) se clasifican en dos grandes grupos: las fibras cuyo núcleo tienen alto índice de refracción y las fibras con band gap fotónico.

Las PCF con núcleo sólido, en el que la luz es guiada por una forma modificada de la reflexión interna total son aquellas donde el revestimiento tiene un menor índice de refracción efectivo (debido a los agujeros de aire) con relación al núcleo sólido.

Las PCF con un centro hueco son aquellas donde la reflexión interna total se puede lograr dentro del núcleo de aire gracias a los efectos fotónicos.

El núcleo de la fibra de cristal fotónico (PCF) es sólido y puede ser fabricado con un solo modo de orientación en rangos de longitudes de onda muy amplios (sin salirse de la región monomodo de la fibra) y con un núcleo muy grande (o zona de modo de gran tamaño) [12, 13].

Debido a la intensidad óptica reducida, las PCF con núcleo de gran área tienen mayor linealidad y un umbral de daño mayor, lo que las hace también más adecuadas para, por ejemplo, la amplificación de pulsos en los amplificadores de fibra, o también para la entrega pasiva de alta potencia de luz.

Como se mencionó anteriormente, la fibra óptica monomodo convencional tiene un área efectivo por debajo de $100 \mu\text{m}^2$ para el modo fundamental, mientras que en las de núcleo de gran área (o LMA PCF) es posible alcanzar valores de área mucho más grandes y con bajas pérdidas por flexión.

Se han desarrollado varios diseños de LMA PCF. En muchos casos, se ha hecho el intento de introducir importantes pérdidas de propagación de los modos de orden superior, lo que es más fácil de mantener en fibras de un solo modo de propagación que en una fibra multimodo. Otro aspecto importante es el modo de minimizar el acoplamiento no deseado.

Algunos ejemplos de las estrategias posibles de maximizar las pérdidas de los modos superiores son: la fibra puede doblarse, en función del diseño de fibra, y las pérdidas inducidas por curvatura pueden ser importantes para los modos de orden superior en un punto donde todavía no son significativas para el modo fundamental, los diseños de fibras se pueden optimizar en ese sentido.

Hay que tener en cuenta que la flexión no sólo presenta pérdidas, sino que también puede reducir el área del modo eficaz. Para realizar una comparación equitativa de los tipos de fibras, este efecto definitivamente tiene que tenerse en cuenta [14].

En las fibras con canales de fuga [15, 16] o en las LMA PCF con un número limitado de canales de aire en el revestimiento [17, 18, 19], el núcleo está rodeado por un pequeño número de grandes agujeros, por lo que todos los modos de propagación de estas fugas son muy selectivos.

Las fibras con núcleo de un gran índice de refracción se dividen en los siguientes subgrupos: Fibras con una gran apertura numérica (NA) (HNA), fibras con una alta no linealidad (HNL) y fibras con núcleo de gran área (LMA).

Por su parte las fibras con band gap fotónico se dividen en: Fibras cuyo núcleo tienen bajo índice de refracción (LIC), la fibra de Bragg (BG) y la fibra con núcleo de aire (AG) o núcleo hueco (HC), ver Figura 1.3.

La transmisión de la luz en las fibras de núcleo hueco puede solamente darse a través del efecto de la zona prohibida o band gap, por lo tanto la gama de longitudes de onda para estas fibras es muy estrecha (pocas decenas de nanómetros en el infrarrojo y en el visible).

Las fibras de Bragg tienen diversas aplicaciones como sensor óptico tales como: el uso en la ingeniería civil y en las grandes construcciones, sensores para la industria aeronáutica, sensores para aplicaciones energéticas, sensores para sistemas de ferrocarriles, para experimentos nucleares, y para muchas aplicaciones químicas y biológicas [20].

Las fibras con gran apertura numérica (HNA) tienen la parte central rodeada

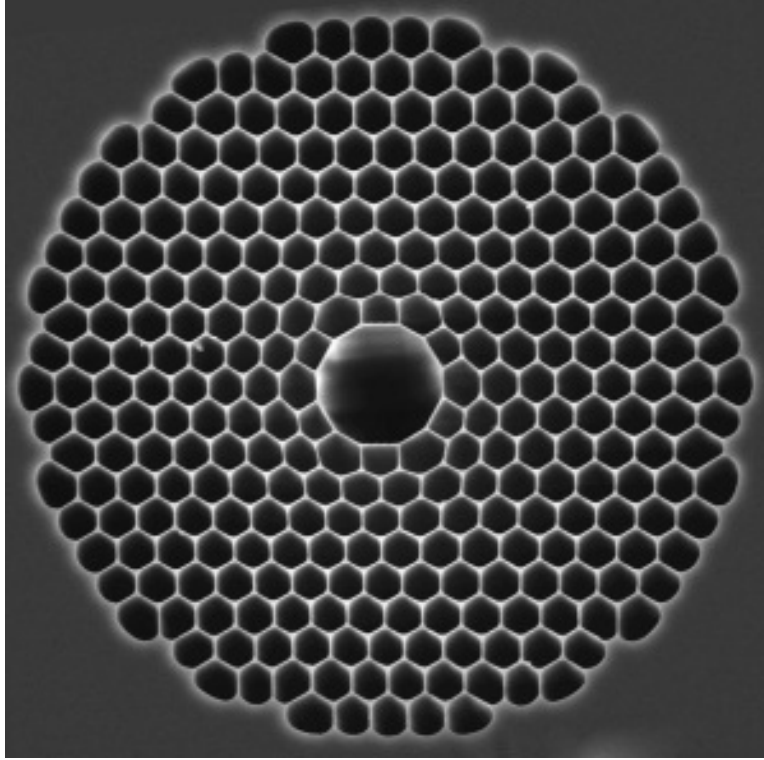


Figura 1.3: Fibra de cristal fotónico con núcleo de aire, la fotografía es gentileza de Optical Fibers A/S

por un anillo de cavidades de aire relativamente grandes. La fibra con modo de gran área (LMA) se usa para grandes dimensiones y poco contraste en el índice de refracción efectivo, finalmente las fibras con alta no linealidad (HNL) tienen dimensiones muy pequeñas del núcleo. Las fibras cuyo núcleo tienen bajo índice de refracción (LIC) son guías de onda.

Actualmente las fibras de cristal fotónico están siendo exploradas tanto en aplicaciones planas como en aplicaciones de fibra. La guía de onda de cristal fotónico ofrece menos pérdidas en la transmisión de la luz incluso con 90 grados de ángulo de inclinación, y puede ser la clave para la fotónica integral, la fibra de cristal fotónico puede proporcionar propiedades particularmente nuevas, por ejemplo se puede fabricar un láser de alta potencia.

Las propiedades de la fibra de cristal fotónico pueden ser escaladas a diferentes longitudes de onda, a través del escalamiento de las dimensiones del cristal (distancia y tamaño de los capilares), sin embargo al hacer esto surge

un gran problema relacionado con la reducción de las grandes pérdidas por dispersión, como resultado de que la estructura del cristal fotónico tiene un tamaño finito.

Un problema general con el uso de modos de gran tamaño en las fibras es que ellas no son compatibles con los componentes estándar de las fibras comunes (Muchos componentes de la fibra óptica sólo están disponibles con tamaños de modo estándar).

Cuando una fibra de modo de gran área se le fusiona o empalma a una fibra estándar, la falta de coincidencia en grandes áreas del modo conduce a una pérdida de potencia excesiva en la articulación. Hay dos soluciones a este problema, que sin embargo no se satisfacen plenamente:

Se puede utilizar una fibra cónica como un convertidor de modo entre las dos fibras. La fibra cónica debe ser tal que el tamaño del área de la fibra de gran superficie coincida con un extremo del cono y el otro extremo de la fibra coincida con el otro lado del cono. Entonces se debe hacer dos empalmes en vez de uno, pero la ventaja es que cada uno puede tener muy pocas pérdidas.

La principal dificultad de este método es que la fibra cónica que se necesita puede ser difícil de fabricarse. Una solución frecuentemente utilizada en experimentos de laboratorio es dejar separadas por un espacio “de acoplamiento” entre la fibra convencional y la fibra con núcleo de gran área.

En este caso se pueden utilizar componentes comunes, esto nos lleva a montajes de laboratorio flexibles, que sin embargo no son muy adecuados para su uso comercial, ya que implican una sensible alineación y son sensibles al polvo, sobre todo debido al polvo que se deposita en los extremos de las fibras, lo que aumenta su atenuación.

En el CIO ya se ha desarrollado la tecnología de fabricación de fibras de cristal fotónico de gran área (LMA PCF) [17, 18, 19], pero la técnica tiene que ser mejorada. También es necesario realizar investigaciones más detalladas de las propiedades ópticas de la LMA PCF.

1.6. Fabricación de las PCF

Uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de las fibras es el proceso de fabricación. En las fibras de cristal fotónico la preforma consiste en un tubo de vidrio, normalmente de 20-30 mm de diámetro exterior y 16-

26 mm de diámetro interior, dentro del cual se acomodan (a lo largo de todo el tubo) delgados tubos y barras de sílice y barras de relleno en el orden adecuado y formando la estructura que se desea tener en la PCF.

Las barras y los tubos por lo general son de un milímetro de diámetro y un metro de longitud. Como núcleo de la preforma se utiliza un cilindro sólido. Después de armar la preforma, se procede a fabricar la fibra óptica que se realiza en una torre de estirado de fibra óptica, similar a la que se usa en la fabricación de fibra óptica convencional.

En la torre de estiramiento la preforma pasa a través de un horno toroidal que la funde uniformemente. Al principio del proceso de fusión de la preforma, se forma una gota de vidrio que el operario toma y va jalando hasta formar un hilo. Este hilo se hace pasar por una serie de rodillos, que giran a una velocidad regulada, para jalar del hilo de vidrio mientras la preforma lentamente va bajando dentro del horno.

La velocidad de giro de los rodillos, la velocidad a la que baja la preforma y la temperatura del horno se deben de regular para evitar que los orificios se deformen o colapsen debido a la tensión superficial. Mientras se fabrica la fibra óptica se recubre con un polímero que se polimeriza con luz ultravioleta.

En la Figura 1.4 podemos observar el horno que calienta la fibra y en la Figura 1.5 el tambor donde se enrolla la fibra.

La técnica del estiramiento es la manera más exitosa de fabricar PCF. Por lo general se realiza el estiramiento en dos etapas, la primera dando una preforma de escala intermedia.

Las PCF se llaman así porque el objetivo inicial era hacer una estructura periódica del revestimiento con dimensiones de la longitud de onda: un ejemplo de cristal fotónico. Otros nombres en uso, como el de fibras perforadas o microestructuradas, hacen hincapié en otras características. Sin embargo, ninguno de estos términos se debe tomar con veracidad ya que algunas PCFs carecen de cualquier periodicidad o agujeros, y todas las fibras ópticas son microestructuradas.

La evidente complejidad de la fibra de cristal fotónico (PCF) o fibra estructurada nos advierte que el diseño de las mismas no es trivial. Se requiere de una simulación precisa y herramientas numéricas sofisticadas. Sin embargo, se pueden conseguir resultados similares mediante la obtención de un índice de refracción equivalente de la envoltura de las fibras.

Varios métodos han sido publicados para encontrar el índice de refracción



Figura 1.4: Horno para el estiramiento de fibras ópticas

del revestimiento y el diámetro del núcleo sólido. Se pueden estimar los parámetros de la fibra tales como el número de modos guiados y las distribuciones de campo de los modos, trazando una analogía con la fibra óptica convencional, la cual se describe en estos métodos. A diferencia de una fibra convencional, la PCF tiene un índice de refracción del revestimiento que puede variar mucho con la longitud de onda, dado que la luz se distribuye entre el aire y el vidrio.

Este índice hace que sea más difícil de estimar la dispersión cromática, pero también es la fuente de la única característica monomodo infinitesimal de ciertos tipos de PCF [21].

Saitoh y Koshiba han proporcionado una forma sencilla para calcular las PCF a través de un gran conjunto de cuidadosas simulaciones de elementos finitos de una amplia gama de PCF con núcleos sólidos. Esta es una herramienta muy eficaz para el diseño de PCF y para lograr una propiedad en particular, que a continuación, puede ser ajustada y además modelada para su posterior fabricación.

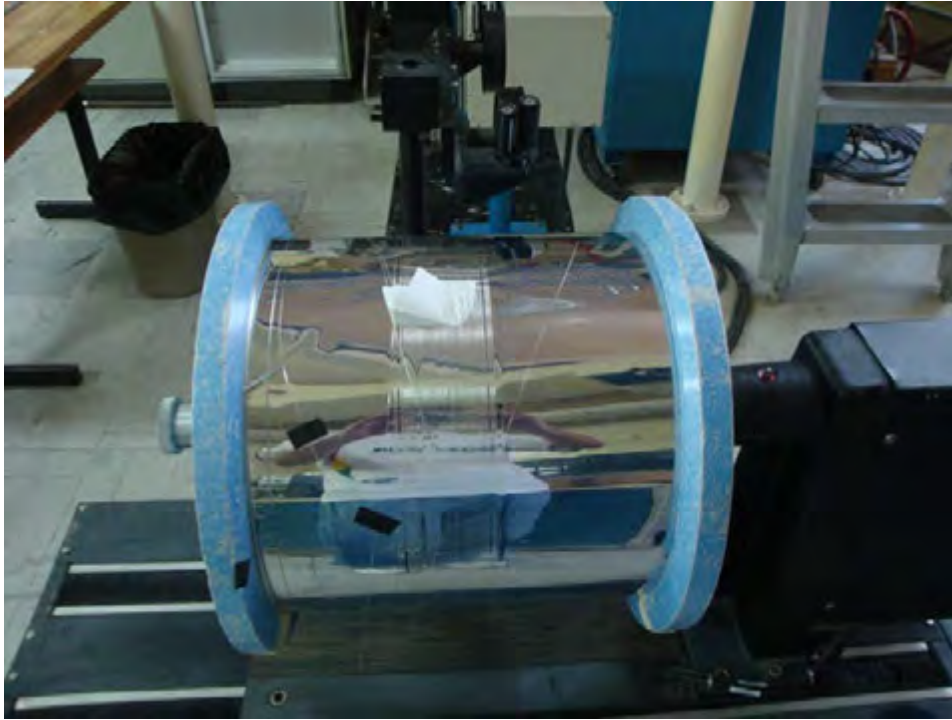


Figura 1.5: Tambor donde se enrolla la fibra

1.7. Fabricación de las Preformas de las PCF

La forma tradicional de fabricar fibras ópticas implica dos principales pasos: La fabricación de la preforma de la fibra y su estiramiento usando una torre de alta temperatura [22]. Para la fibra óptica convencional, ambas técnicas fueron desarrolladas durante las dos o tres décadas pasadas y hoy pueden ser consideradas bastante maduras.

Uno de los métodos más usados se trata de apilar manualmente tubos capilares y barras sólidas de sílice, esto permite una fabricación rápida, menos costosa y más flexible de este tipo de fibras. El primer método fue presentado por Birks en 1996, quien describió la fabricación del cristal fotónico 2D usando un método, donde se hizo un hoyo con la ayuda de un taladro dentro de una barra cilíndrica de sílice.

Inicialmente Birks empezó con una barra de 25 cm de longitud con un diámetro de aproximadamente 3 cm y usando un taladro ultrasónico para formar

un agujero central a lo largo de toda la barra. Después de lo cual se realizó un esmerilado a los seis lados del tubo para formar un hexágono.

Después se estiraron estos tubos hasta obtener menores dimensiones (aproximadamente 1 mm de diámetro), estos tubos después se apilaron en forma empaquetada (encerrada), típicamente son alrededor de 300 tubos capilares que van dentro de una preforma, los cuales nuevamente se estiran en la torre, para obtener la fibra micro estructurada deseada.

Recientemente el método ha sido simplificado, en el sentido que se apilan los capilares y barras en su forma cilíndrica (el esmerilado hexagonal ha sido omitido).

Después del estiramiento se obtiene una fibra como la que se muestra en la Figura 1.6.

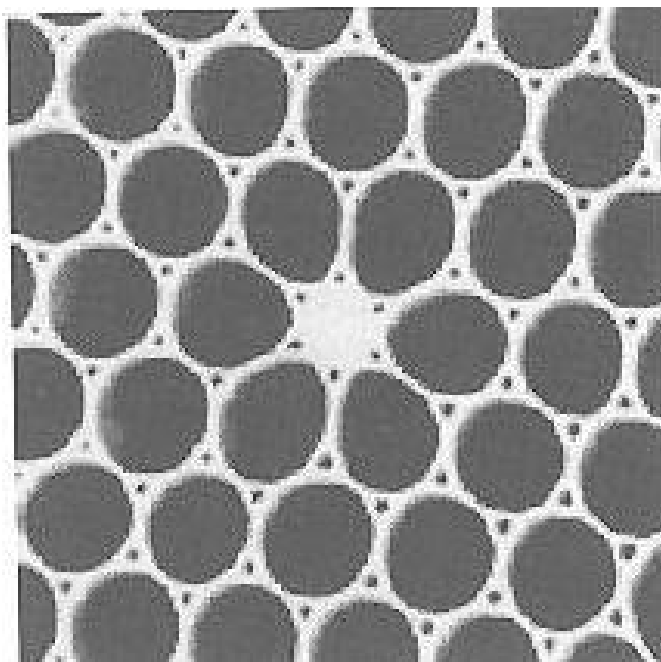


Figura 1.6: Micrografía electrónica de barrido de la fase final de una fibra de cristal fotónico que tiene numerosos agujeros pequeños que se han mantenido abiertos después de la elaboración de la fibra. La fotografía es gentileza de Cristal A/S

1.8. Estiramiento de las PCF

El estiramiento de la fibra de cristal fotónico se realiza generalmente en una torre de estiramiento convencional que opera relativamente a baja temperatura, alrededor de los 1900°C .

La razón de que el estiramiento se haga a esta temperatura es para que no se colapsen los capilares de aire en el interior de la fibra [23]. El proceso de estiramiento de la fibra se puede observar en la Figura 1.7.

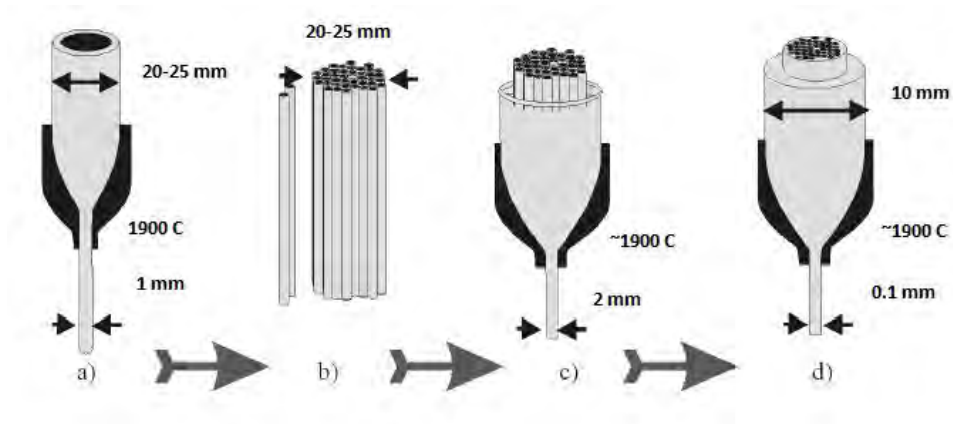


Figura 1.7: Fabricación de una fibra de cristal fotónico: a) creación de los capilares individuales, b) formación de la preforma, c) estiramiento de la preforma intermedia, d) estiramiento final de la fibra

La clave en el estiramiento de la fibra de cristal fotónico es mantener la estructura regular a lo largo de toda la fibra. Las dimensiones típicas de las fibras son de 125 micrómetros de diámetro. En la Figura 1.8 se muestra una preforma en proceso de estiramiento.

1.9. Índice de Refracción Efectivo

Para establecer la herramienta numérica cualitativa de las propiedades de la fibra de cristal fotónico Birks [12], propuso un método en el cual se usa una fibra geoméricamente estabilizada, es decir que su diámetro y sus dimensiones internas son prácticamente constantes a lo largo de toda la fibra.

La idea fundamental aquí es la de evaluar la periodicidad de las estructuras de agujeros en la estructura del revestimiento, reemplazando esta envoltura



Figura 1.8: Imagen que ilustra cómo las dimensiones exteriores de la preforma se reducen para formar la fibra de cristal fotónico.

por un material de índice de refracción efectivo equivalente.

En este modelo, el resultado de la guía de onda consiste en un núcleo y una envoltura cuyos índices de refracción son n_{co} y n_{cl} respectivamente. El núcleo es de sílice puro, pero la determinación del índice de refracción de la región micro estructurada se la toma en términos de la constante de propagación del modo de orden inferior, el cual puede propagarse en un material de la envoltura infinitamente.

El primer paso para determinar el índice de refracción efectivo es determinar el modo del campo, resolviendo la ecuación de onda escalar de una sola celda. El diámetro de esta celda es igual a la separación entre las celdas de la estructura de la envoltura, por reflexión simétrica la condición límite de la celda (de radio $\Lambda/2$) es $\frac{d\Psi}{ds} = 0$, donde s es la coordenada normal del borde.

La constante de propagación del modo espacial fundamental resultante, está definida por el índice de refracción efectivo de la envoltura, como se indica en la fórmula 1.1:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta_{\text{FSM}}}{k} \quad (1.1)$$

Donde k es la constante de propagación libre en el espacio de la luz con una longitud de onda λ .

1.10. Características de la LMA PCF

Son fibras ópticas que tienen propiedades específicas de guía de onda debido al área grande que presenta su núcleo. Al mismo tiempo se mantiene la operación en el modo fundamental, lo cual es muy interesante.

El desarrollo de las fibras de gran área es importante para la amplia gama de aplicaciones prácticas, en las que se requiere una gran potencia óptica. Para las aplicaciones donde se transmite una gran potencia óptica, es generalmente importante que la transmisión pueda ser hecha sin la influencia de efectos no lineales no deseados, que aparecen por la presencia del material de la fibra [24].

Por las características geométricas de la sección transversal de la fibra, es posible diseñar una fibra de cristal fotónico con propiedades completamente diferentes, es decir, con gran área efectiva.

La sección transversal típica de este tipo de fibras, llamadas fibras con núcleo de gran área, consiste en una red triangular de agujeros de aire, donde el núcleo está definido por la ausencia de un agujero de aire.

Un ejemplo de una fibra de cristal fotónico triangular se indica en la Figura 1.9.

El diámetro del núcleo de esta fibra se puede definir como $D = 2\Lambda - d$, que corresponde a la distancia entre agujeros opuestos. Cuando $d/\Lambda \leq 0,4$, la fibra de cristal fotónico triangular es infinitamente monomodo, es decir que tiene un solo modo para cualquier longitud de onda [25, 26].

Bajo esta condición, el tamaño del núcleo o del campo está determinado por la longitud de onda de dispersión cero I_0 , el diámetro del campo modal (MFD) y la apertura numérica (NA) de la fibra. Las fibras de cristal fotónico con núcleo de gran área suelen ser explotadas para aplicaciones de alta potencia, ya que las limitaciones lineales se reducen drásticamente.

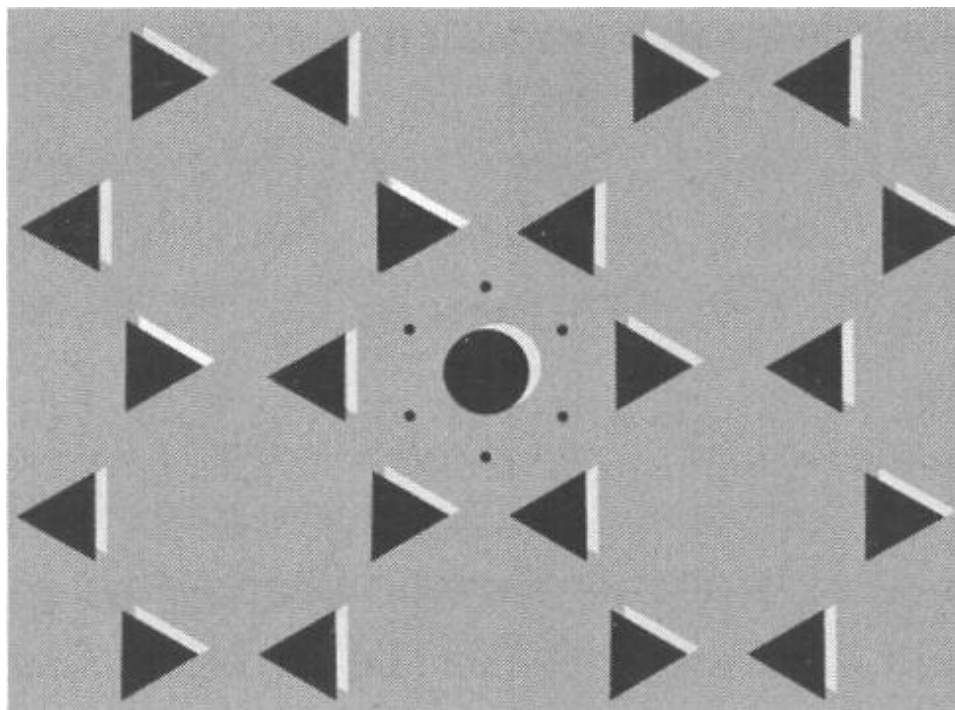


Figura 1.9: Fibra de cristal fotónico (o microestructurada) con cavidades triangulares, la fotografía es gentileza de Optical Fibers A/S

En particular, las fibras con núcleo de gran área se utilizan actualmente para aplicaciones en longitud de onda corta, que se encuentra en la radiación ultravioleta (UV) y la banda visible, como la generación y entrega de los haces ópticos de alta potencia para la soldadura láser y mecanizado, los láseres ópticos, y amplificadores, proporcionando ventajas significativas con respecto a la fibra óptica tradicional [27].

Las fibras convencionales activas de los láseres y amplificadores son básicamente fibras estándar de transmisión, cuyo núcleo ha sido dopado con elementos raros (como Terbio e Yterbio). Estas fibras, por lo general se bombean con un solo láser monomodo. Debido a limitaciones de su poder, este tipo de fibra no es adecuada para aplicaciones de alta potencia sino solo del orden de 1 W, e inferiores.

Las fibras de alta potencia se diseñan generalmente con una estructura de doble revestimiento, donde una segunda región con bajo índice de refracción actúa como revestimiento del núcleo de gran área. En el centro del núcleo

se encuentra un núcleo mucho más pequeño con material dopado, como se indica en la Figura 1.10.

Con respecto al diseño de bombeo tradicional del núcleo, el doble revestimiento de las fibras presenta un área mayor y un bombeo con gran apertura numérica, lo que permite el bombeo por diodos a un costo relativamente bajo. Sin embargo, es importante subrayar que, cuando se considera de alto poder, es necesario optimizar las características de la fibra, tales como NA, la dimensión central y la longitud, con el fin de obtener un acoplamiento eficiente de la luz, la reducción de los efectos no lineales y buenas propiedades térmicas [27].

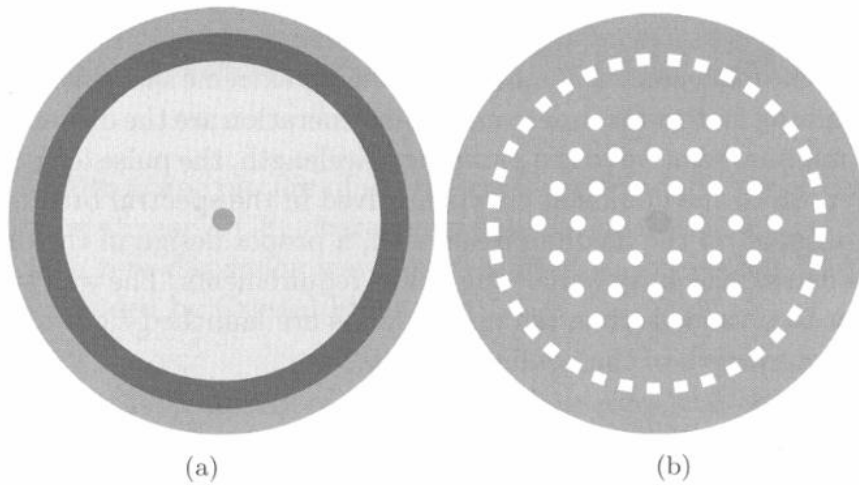


Figura 1.10: Sección transversal de: a) una fibra con núcleo dopado y doble revestimiento, b) una fibra de cristal fotónico, donde el núcleo activo está envuelto por agujeros de aire. La fotografía es gentileza de Optical Fibers A/S

La posibilidad de realizar las fibras de gran área (LMA por sus siglas en inglés) con umbrales de energía muy altos es la aplicación futura de las fibras de cristal fotónico con guía de aire. El índice de guía de las fibras de cristal fotónico ofrece una ruta alternativa para los modos de gran área.

El índice de guía de las fibras LMA puede ser producido por fibras diseñadas con un gran espacio entre capilares, con una Λ típicamente cerca de 10λ (donde λ es la longitud de onda), o mayor, y los capilares de un tamaño de d/Λ , cerca de 0.45 o más pequeño.

Esta fibra es interesante, no solamente porque tiene un modo de gran diá-

metro (aproximadamente 20 micrones a una longitud de onda de 1550 nm) sino también porque es monomodo para cualquier longitud de onda en el que el material de sílice sea transparente.

Los efectos de polarización son típicamente menos importantes para este tipo de fibras, debido a la estructura simétrica que tiene, y esto es suficiente para usar un modelo escalar en el análisis de las propiedades básicas de la fibra.

Las pérdidas por doblado macroscópico limitan la practicidad de las fibras de cristal fotónico de gran área. Se han identificado dos mecanismos de pérdidas distintos en las fibras ópticas convencionales: las pérdidas por transición y las pérdidas solo del macro doblado [28].

Como la luz viaja dentro de una fibra curvada, el modo se distorsiona, causando una pérdida por transición (parecida a la pérdida por empalme). Las pérdidas por macro doblado ocurren continuamente a lo largo de cualquier sección curva de una fibra óptica. El mecanismo es el siguiente: En la parte radial exterior los detalles del modo deben viajar más rápido que la velocidad de la luz para compensar la curva, y por lo tanto ocurre la pérdida.

1.11. Parámetros Principales en la Descripción del Gran Área Transversal del Núcleo en las PCF

Antes de discutir los recientes avances implementados en la práctica de las fibras de cristal fotónico con núcleo de gran área transversal, esto puede ser ventajoso para buscar un poco más de cerca los parámetros principales, los cuales son usados para describir las fibras ópticas en general y las fibras de cristal fotónico con modo de gran área transversal en particular. Muchos de estos parámetros han sido usados regularmente por años en conexiones de alta tecnología de fibra estándar, y son relevantes también para el caso de las fibras de cristal fotónico.

Uno de los parámetros fundamentales de las fibras ópticas es la apertura numérica, que se define como en la fórmula 1.2:

$$NA = \sin \theta_\nu \quad (1.2)$$

La cual se define como el límite para $z \rightarrow \infty$, por la mitad del ángulo de

divergencia θ_ν entre los ejes y la intensidad ν del punto $r_\nu(z)$ [29] (fórmula 1.3):

$$\tan \theta_\nu = \lim_{z \rightarrow +\infty} \frac{r_\nu(z)}{z} \quad (1.3)$$

1.12. Limitaciones de las PCF en Nuevas Tecnologías y Telecomunicaciones

Las fibras de cristal fotónico se están considerando en la actualidad principalmente para los componentes ópticos en dispositivos opto electrónicos y como un medio óptico de alta velocidad de transmisión, lo cual sigue siendo objeto de investigación [30, 31]. Esto se debe principalmente a la alta atenuación de estos tipos de fibras.

Recientemente, el nivel de atenuación se ha reducido a un 0,28 dB/km a una longitud de onda de 1.55 micras [32]. Tal avance alienta a los investigadores a replantear nuevas aplicaciones a estas fibras en la transmisión de la señal. Por otra parte, avanza rápidamente en la tecnología de la fabricación, en la que también están dando impulso a este tipo de ideas [33].

Los sistemas de transmisión óptica requieren de la fibra de cristal fotónico con gran área efectiva [34]. El gran área es necesaria no sólo para ayudar a la transmisión óptica de banda ancha, sino también para minimizar las pérdidas de acoplamiento en la fibra estándar. Una vez más, en los sistemas de comunicación de banda ancha la dispersión de la fibra y las pérdidas internas juegan un papel muy importante. Por ejemplo, en los sistemas de división de longitud de onda multiplexada es esencial mantener una respuesta uniforme en los canales de longitud de onda diferente.

Hay muchos informes [34, 35] en la literatura referente a la gestión de la dispersión de las fibra de cristal fotónico. Algunos de los cuales garantizan bajas pérdidas de confinamiento [21]. A pesar de esto, sólo hay unos pocos artículos que tratan de fibras de cristal fotónico que tengan gran área y características de dispersión plana al mismo tiempo [33, 34, 35, 21] en las longitudes de onda, en las que se opera en comunicación.

Matsui y otros, ver [34] han propuesto una fibra de cristal fotónico de gran área en 2005. Ellos han alcanzado teóricamente un modo, cuya área efectiva

es superior a las 100 micras cuadradas con una estructura de doble revestimiento que se caracteriza por dos diferentes pasos o Pitch y diámetros de los agujeros de aire.

A pesar de que la pérdida de confinamiento de esta fibra es baja, tal fibra con un revestimiento doble [34] es un todo un reto en cuanto a su fabricación. Reeves y otros, ver [29], también han investigado una fibra de cristal fotónico con un área efectiva de 44 micras cuadradas, pero esta tiene una pérdida de confinamiento alta, incluso poniéndole 11 capas de agujeros.

Además, el diseño de otros [35] contiene agujeros de aire arbitrariamente distribuidos que también son difíciles de fabricar. Por lo tanto, es necesario abordar este problema adecuadamente.

1.13. Diseño de las LMA PCF

La Figura 1.11 muestra dos diseños de fibras de cristal fotónico de gran área. El revestimiento de dos capas se compone de un paso común de Λ y dos diferentes diámetros de agujero de aire d_1 y d_2 , donde d_1 es inferior a d_2 . Los diámetros de los anillos interiores son menores para obtener un área mayor. La figura 1.11a no tiene el agujero de aire en el centro, mientras que la figura 1.11b tiene el agujero de aire con un diámetro d_c .

Para efectos de comparación, todos los parámetros de las dos fibras de cristal fotónico son los mismos. Por otra parte, el diámetro d_c es el mismo que el diámetro de los agujeros de aire d_1 . Esto es crucial para la precisión de fabricación y la guía de reflexión interna total. La dispersión y las áreas efectivas de diferentes números de capas interiores han sido investigadas. Por ejemplo, una fibra de cristal fotónico con el d_c y tres capas del mismo diámetro se muestra en la Figura 1.11.

En cuanto al diseño de fibras ópticas de gran área se ha demostrado que para las fibras de cristal fotónico con la relación de distancia entre centros y el diámetro de las mismas d/Λ menor a 0.4, la cual normalmente se fabrica con muchas capas de capilares hexagonales (alrededor de 5 o 6), no tiene sentido poner tantas capas, ya que 3 capas es suficiente, esto lo demostró Minkovich [36], lo cual simplificó notoriamente la fabricación de este tipo de fibras.

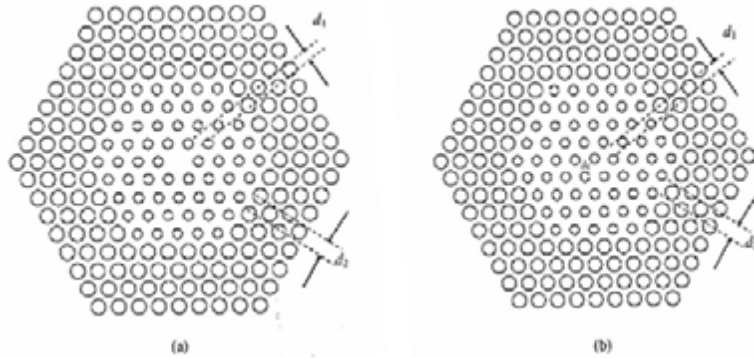


Figura 1.11: Modelos de fibras de cristal fotónico (microestructuradas): a) sin agujero de aire en el centro, b) con agujero de aire en el centro

1.14. Seguridad en el Laboratorio de Estiramiento de Fibras Ópticas

El laboratorio de estiramiento de fibras ópticas es un lugar con bastantes elemento de riesgo para la integridad humana, debido a lo cual se debe respetar el protocolo de seguridad e higiene en este lugar, también es de suma importancia mantener la limpieza y el orden en este lugar debido a que se trabaja con un equipo de alta precisión (la torre de estiramiento).

En el proceso de fabricación es importante que esté todo limpio y ordenado, ya que la presencia de polvo puede interferir significativamente en el resultado (la fibra obtenida) debido a que se estira por fusión del vidrio.

Los factores de peligro en el laboratorio donde se encuentra la torre de estiramiento de fibras son los siguientes:

- Elementos químicos
- Gases
- Aire comprimido
- Material a alta temperatura
- Vidrios
- Elementos mecánicos en movimientos
- Escaleras

Entre los elementos químicos que se encuentran en el laboratorio están: el revestimiento de la fibra, la acetona, el propanol, la resina epoxi, removedores de pinturas, etc.

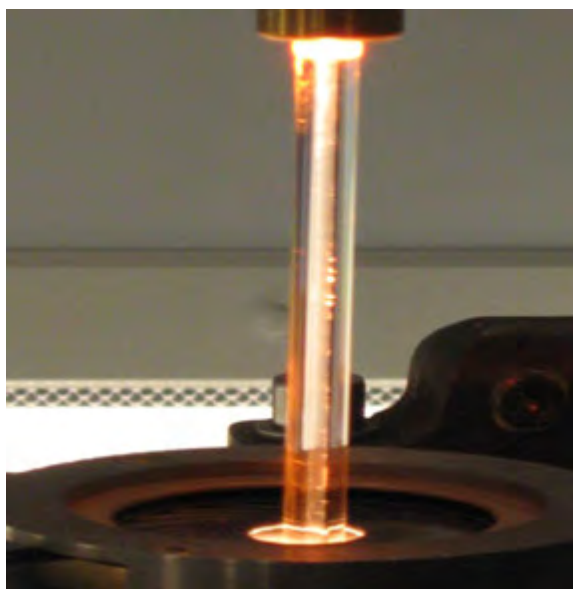


Figura 1.12: Preforma a alta temperatura (1900 grados centígrados) en proceso de fabricación

El revestimiento de la fibra es un polímero que se aplica en forma líquida a la fibra, durante la fabricación, es decir después de que se estira el vidrio (núcleo de la fibra), esta pasa por un recipiente que contiene este polímero en forma líquida y sale la fibra ya revestida por un agujero en la parte inferior del mismo. Después la fibra pasa por una caja especial donde es iluminada por lámparas UV, las cuales secan a este material (polímero) externo de la fibra.

La acetona es un solvente que se utiliza para limpiar, es inflamable y no debe ser utilizado cerca del horno fundidor. Se deben usar guantes para manipular la acetona. El propanol también es un solvente usado para la limpieza y se debe tener el mismo cuidado que con la acetona. La resina epoxi (pegamento) se usa ocasionalmente para la fabricación de las preformas de la fibra y se considera un elemento peligroso para el medio ambiente.

Los removedores de pintura Nitro-mors, se usan para remover manualmente el polímero del revestimiento de la fibra, se considera nocivo y debe manejarse solo con guantes.

Los gases que se usan en el laboratorio de la torre de estiramiento son: el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno y el argón. El hidrógeno y el oxígeno se ocupan para el soplete, las altas temperaturas pueden ablandar el cristal de sílice y existe el peligro de explosión cuando se ocupa de forma inadecuada.



Figura 1.13: Pieza móvil que regula el movimiento de la preforma dentro del horno de la torre de estiramiento

El nitrógeno y el Argón son gases inertes, pero son asfixiantes en lugares cerrados.

El aire comprimido se utiliza a veces para limpiar el contenedor del recubrimiento y el riesgo aquí es que las partículas vuelen y entren a los ojos de quien esté realizando este trabajo. Los materiales a alta temperatura son la misma preforma y el horno de la máquina de estiramiento.

El horno de la máquina de estiramiento cumple la función de fundir la preforma a una temperatura de unos 1900 C, ver Figura 1.12, dependiendo de la preforma, y este horno es muy especial ya que su principal tarea es mantener esta temperatura lo más constante posible, el sector del horno es muy peligroso ya que al tener contacto con alguna pieza o con la misma preforma

en algún momento de la fabricación, puede conllevar a serias quemaduras en la piel, como se muestra en la Figura 1.14.



Figura 1.14: Quemadura a consecuencia del contacto de la piel con el vidrio o con una pieza metálica

Cuando se trabaja con piezas de vidrio, ya sea en el cortado, esmerilado, etc. es obligatoria la utilización de gafas de protección, ya que las astillas y restos de vidrio pueden ingresar al ojo causando serios daños al mismo.

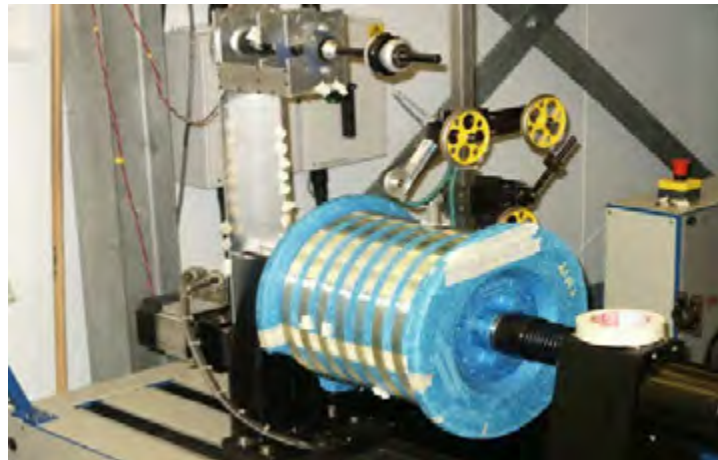


Figura 1.15: Mecanismo que enrolla la fibra en el tambor

También es importante que en el laboratorio existan dos basureros: uno especialmente para residuos de vidrios, como ser fibras y restos de preformas quebradas, y el otro para los otros tipos de basura, con el objetivo de mantener la limpieza en este recinto.

Cabe recalcar que los pequeños residuos de fibras que se echan al piso o que se dejan en las mesas de trabajo, pueden ingresar con mucha facilidad en la piel, y después es muy complicado de retirar, por eso es muy importante que todos estos pequeños trozos de fibras se echen en el basurero adecuado.

En la torre de estiramiento existen varios elementos mecánicos en movimiento, desde el sujetador de la fibra que se mueve a un paso constante, ver Figura 1.13, hasta el sistema que enrolla la fibra en el tambor, el cual consta de un juego de poleas y varios mecanismos automatizados para realizar esta tarea con mucho más facilidad y precisión, véase Figura 1.15. Se debe tener sumo cuidado al trabajar cerca de estas partes para no sufrir daños físicos.

El último riesgo existente en el laboratorio de la torre de estiramiento está ligado a las dimensiones y sobre todo a la altura de dicho equipo. Debido a que se tiene una altura bastante grande y a que existen equipos que hay que instalar y ajustar en su parte superior, en esta máquina se tiene una plataforma de trabajo en la parte superior, a la cual se accede con la ayuda de una escalera (esta escalera es parte de la máquina, no es una escalera portátil), se debe tener mucho cuidado al subir y bajar, para no sufrir caídas y traumas físicos, ver Figura 1.16. Recuérdese que no hay trabajo tan urgente que no pueda hacerse con seguridad.

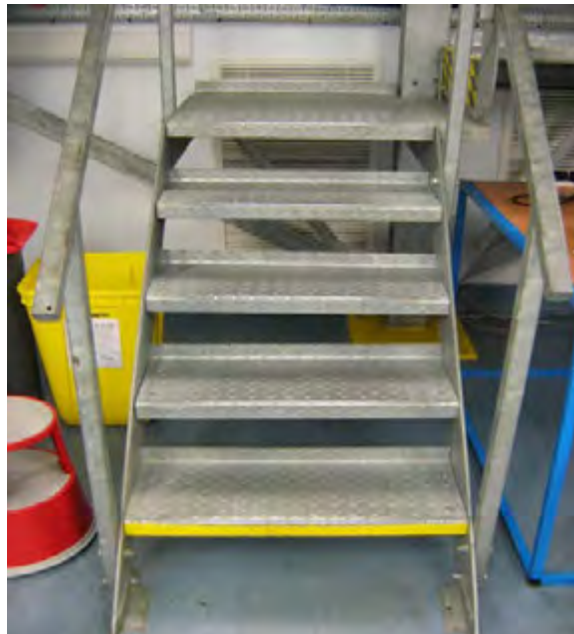


Figura 1.16: Escaleras de la torre de estiramiento de fibras

Bibliografía

- [1] J.A. Buck. *Fundamentals of optical fibers*. Wiley–Interscience, 2004.
- [2] S.E. Miller and I.P. Kaminov. *Optical Fiber Telecommunications II*. Academic Press, 1998.
- [3] G. Keiser. *Optical fiber communications*. Wiley Online Library, 2000.
- [4] J. Hecht and L. Long. *Understanding fiber optics*, volume 3. Prentice Hall Columbus, 2002.
- [5] E. Udd. *Fiber optic sensors*. Wiley Online Library, 1991.
- [6] G.A. Thomas, B.I. Shraiman, P.F. Glodis, and M.J. Stephen. Towards the clarity limit in optical fibre. *Nature*, 404(6775):262–264, 2000.
- [7] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, and S.E.B. Libori. Macro–bending loss properties of photonic crystal fibers. *Electronics Letters*, 37(19):287–289, 2001.
- [8] S.C. Rashleigh and R. Ulrich. Polarization mode dispersion in single–mode fibers. *Optics Letters*, 3(2):60–62, 1978.
- [9] J.C. Knight, T.A. Birks, P.S.J. Russell, and D.M. Atkin. All–silica single–mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Optics Letters*, 21(19):1547–1549, 1996.
- [10] C.M. Soukoulis. Photonic band gaps and localization. In *NATO Advanced Study Institute series. Series B, Physics*. Plenum, 1993.
- [11] J. Rarity and C. Weisbuch. *Microcavities and photonic bandgaps: physics and applications*. Number 324. Springer, 1996.
- [12] T.A. Birks, J.C. Knight, and P.S.J. Russell. Endlessly single–mode photonic crystal fiber. *Optics letters*, 22(13):961–963, 1997.
- [13] J.C. Knight. Photonic crystal fibres. *Nature*, 424(6950):847–851, 2003.
- [14] J.M. Fini. Bend–resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area. *Optics Express*, 14(1):69–81, 2006.
- [15] W.S. Wong, X. Peng, J.M. McLaughlin, and L. Dong. Breaking the limit of maximum effective area for robust single–mode propagation in optical fibers. *Optics letters*, 30(21):2855–2857, 2005.

- [16] L. Dong, J. Li, and X. Peng. Bend-resistant fundamental mode operation in ytterbium-doped leakage channel fibers with effective areas up to $3160\text{ }\mu\text{m}^2$. *Optics Express*, 14(24):11512–11519, 2006.
- [17] U.P. Minkovich, A.V. Kir'yanov, A.B. Sotsky, and L.I. Sotskaya. Large-mode-area holey fibers with a few air channels in cladding: modeling and experimental investigation of the modal properties. *Journal of the Optical Society of America B*, 21(6):1161–1169, 2004.
- [18] U.P. Minkovich, A.V. Kir'yanov, and S. Calixto. Large-hole-large-spacing holey fibers with a few air holes: Fabrication and measurements of light-delivering properties and optical losses. *Laser physics*, 14(5):767–771, 2004.
- [19] V.P. Minkovich, A.V. Kiryanov, and F. Mendoza. Fibra hueca monomodo de núcleo grande, con baja sensibilidad a pérdidas por doblamiento. *Patente No. GT/a/2004/000016, México*, 2004.
- [20] A. Cutolo, A. Cusano, and J. Albert. *Fiber Bragg grating sensors—advancements and industrial applications*. Bentham Science Publishers, 2011.
- [21] K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa, and E. Sasaoka. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion. *Optics Express*, 11(8):843–852, 2003.
- [22] A. Bjarklev. *Optical fiber amplifiers: design and system applications*. Artech House, 1993.
- [23] J.B. Eom, K.W. Park, Y. Chung, W.T. Han, U.C. Paek, D.Y. Kim, and B.H. Lee. Optical properties measurement of several photonic crystal fibers. *Proc. SPIE—Int. Soc. Optical Eng.: Photonics West*, pages 124–131, 2002.
- [24] J.C. Knight, T.A. Birks, R.F. Cregan, P.S.J. Russell, and P.D. de Sandro. Large mode area photonic crystal fibre. *Electronics Letters*, 34(13):1347–1348, 1998.
- [25] B. Kuhlmeier, R. McPhedran, C. de Sterke, P. Robinson, G. Renversez, and D. Maystre. Microstructured optical fibers: where's the edge? *Optics Express*, 10(22):1285–1290, 2002.
- [26] N.A. Mortensen, J.R. Folkenberg, M.D. Nielsen, and K.P. Hansen. Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers. *Optics letters*, 28(20):1879–1881, 2003.

- [27] R.E. Kristiansen, K.P. Hansen, J. Broeng, P.M.W. Skovgaard, M.D. Nielsen, A. Petersson, T.P. Hansen, B. Mangan, C. Jakobsen, and H.R. Simonsen. Microstructured fibers and their applications. pages 37–49, 2005.
- [28] W.A. Gambling, H. Matsumura, C.M. Ragdale, and R.A. Sammut. Measurement of radiation loss in curved single-mode fibres. *IEEE Journal of Microwaves, Optics and Acoustics*, 2(4):134–140, 1978.
- [29] W. Reeves, J. Knight, P. Russell, and P. Roberts. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers. *Optics Express*, 10(14):609–613, 2002.
- [30] M. Nielsen, C. Jacobsen, N. Mortensen, J. Folkenberg, and H. Simonsen. Low-loss photonic crystal fibers for transmission systems and their dispersion properties. *Optics Express*, 12(7):1372–1376, 2004.
- [31] K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, C. Fukai, and I. Sankawa. Ultrawide-band single-mode transmission performance in a low-loss photonic crystal fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 23(1):7–12, 2005.
- [32] J. Zhou, K. Tajima, K. Nakajima, K. Kurokawa, C. Fukai, T. Matsui, and I. Sankawa. Progress on low loss photonic crystal fibers. *Optical Fiber Technology*, 11(2):101–110, 2005.
- [33] P. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B. Mangan, D. Williams, L. Farr, M. Mason, A. Tomlinson, T. Birks, and J. Knight. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres. *Optics Express*, 13(1):236–244, 2005.
- [34] T. Matsui, J. Zhou, K. Nakajima, and I. Sankawa. Dispersion-flattened photonic crystal fiber with large effective area and low confinement loss. *Journal of Lightwave Technology*, 23(12):4178–4183, 2005.
- [35] N. Florous, K. Saitoh, and M. Koshiba. The role of artificial defects for engineering large effective mode area, flat chromatic dispersion, and low leakage losses in photonic crystal fibers: Towards high speed reconfigurable transmission platforms. *Optics Express*, 14(2):901–913, 2006.
- [36] U.P. Minkovich. *Special photonic crystal fibers: modeling, fabrication and application*. Lambert Academic Publishing, 2011.

CAPÍTULO 2

FÓRMULAS PARA EL DISEÑO DE FIBRAS DE CRISTAL FOTÓNICO O MICROESTRUCTURADAS

Existen varios métodos para realizar el diseño de fibras de cristal fotónico, y en este capítulo se estudiará el método más práctico y más cercano a los valores prácticos reales [1].

Las descripciones teóricas de las fibras de cristal fotónico están basadas en aproximaciones numéricas, tales como el método de la expansión de ondas planas [2], el método de los multipolos [3], el método de los elementos finitos (FEM) [4, 5], y varios más, debido a la complejidad relativa de la sección transversal de una fibra óptica de cristal fotónico o microestructurada para la cual la simetría rotacional no existe. No obstante, las simulaciones son por lo general muy costosas y requieren de mucho tiempo.

Recientemente, un análisis de aproximaciones basado en el parámetro V (frecuencia normalizada) se usa cada vez más para el diseño de fibras ópticas convencionales y se ha implementado para el diseño de fibras de cristal fotónico o microestructuradas [6].

Para definir correctamente el parámetro V , se analizaron varias propiedades que son propias de las fibras microestructuradas dentro del marco de la ya establecida teoría de la fibra clásica sin necesidad de realizar operaciones computacionales tan complejas y difíciles. El parámetro V es un camino simple para diseñar fibras microestructuradas, el factor limitante es que se requiere de un método numérico para obtener el índice de refracción efectivo de la envoltura.

Si tomamos una relación no solamente del parámetro V , sino también del parámetro W (constante normalizada de atenuación transversal), entonces solo dependerá de la longitud de onda y de los parámetros estructurales, y

esto es muy útil para el diseño de fibras microestructuradas.

Es decir que a través de este método, en el que se proporciona una relación de los parámetros V y W , para una fibra microestructurada, los únicos parámetros que se requieren son el diámetro interno de los tubos capilares y la distancia entre centros de estos tubos capilares, es decir en la estructura.

2.1. La Expresión para el Parámetro V

Se considera una fibra microestructurada con capas de capilares alrededor del núcleo que forman hexágonos concéntricos alrededor de una barra cilíndrica, que funciona como el núcleo de la fibra. En el capítulo III se muestra el diseño estructural de la fibra en Autocad, también en Matlab. El parámetro d es el diámetro de los capilares después de estirada la fibra y Λ es la distancia entre los centros de dos capilares colindantes y el índice de refracción del sílice es de 1.45 (esto se muestra en el capítulo del diseño estructural de la fibra en AUTOCAD).

Las fibras microestructuradas pueden ser caracterizadas por el parámetro V , el cual se toma de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{FSM}}^2} = \sqrt{U^2 + W^2} \quad (2.1)$$

$$U = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{eff}}^2} \quad (2.2)$$

$$W = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{FSM}}^2} \quad (2.3)$$

Donde λ es la longitud de onda de trabajo, n_{co} es el índice de refracción del núcleo y n_{FSM} es el índice de refracción de la envoltura, definido como el índice efectivo del modo fundamental del espacio en el que están los capilares [7], n_{eff} es el índice del modo fundamental y a_{eff} es el área efectiva del núcleo que se define como la relación $\Lambda/\sqrt{3}$ [4, 6]. Los parámetros U y W son llamados la fase normalizada transversal. Mortensen N.A., Folkenberg J.R., Nielsen M.D y Hansen K.P. propusieron el siguiente parámetro V_{eff} para fibras de cristal fotónico hexagonales(fórmula 2.4):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \Lambda \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{FSM}}^2} \quad (2.4)$$

Y publicaron la relación para V_{eff} de la ecuación 2.4 [8]. Esta relación es intrínsecamente diferente del parámetro V original en la teoría de las fibras ópticas comunes o escalonadas y corresponde al parámetro W . Por lo tanto parece ser difícil aplicar el principio de las fibras comunes a las fibras microestructuradas. Se adopta la definición del parámetro V de la ecuación 2.1 [6], pero un factor limitante para usar la ecuación 2.1 es que requiere de un método numérico para encontrar el índice de refracción efectivo de la envoltura n_{FSM} .

La Figura 2.1 nos muestra los valores de V calculados a través del método de elementos finitos [8], como una función de λ/Λ y de d/Λ en un rango que va desde 0.1 hasta 0.8 con pasos de 0.1, los cuales indican los valores encontrados con ayuda del método numérico con la ayuda de la expresión de la fórmula 2.5

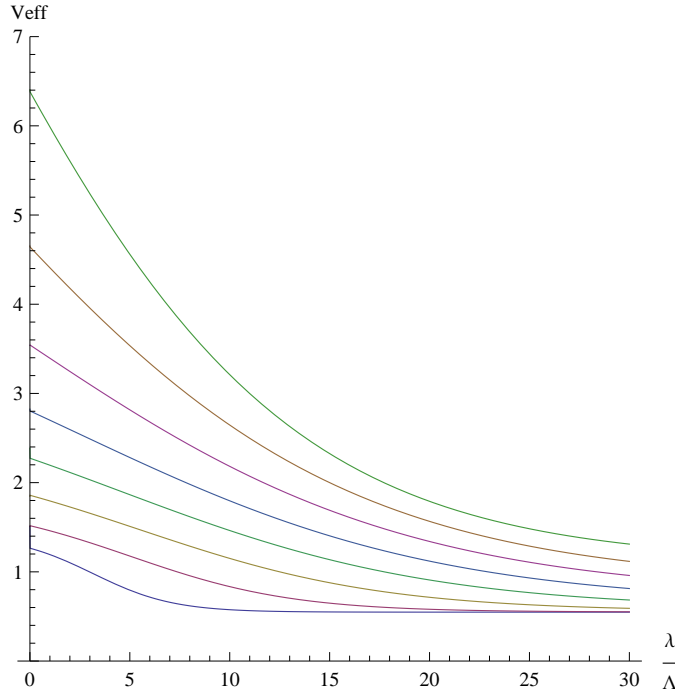


Figura 2.1: Relación del parámetro V con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ (desde 0.1 hasta 0.8)

$$V \left(\frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda} \right) = A_1 + \frac{A_2}{1 + A_3 \exp(A_4 \lambda / \Lambda)} \quad (2.5)$$

Para una búsqueda adecuada de otros valores de V en la ecuación 2.5 se usan los parámetros A_i (para $i =$ de 1 a 4), los cuales dependen solamente de d/Λ , el dato se describe en la siguiente ecuación 2.6

$$A_i = a_{i0} + a_{i1} \left(\frac{d}{\Lambda} \right)^{b_{i1}} + a_{i2} \left(\frac{d}{\Lambda} \right)^{b_{i2}} + a_{i3} \left(\frac{d}{\Lambda} \right)^{b_{i3}} \quad (2.6)$$

Los coeficientes de a_{i0} a a_{i3} y de b_{i1} a b_{i3} se muestran en el Cuadro 2.1

Para λ/Λ y $V \geq 0,85$ la expresión de la ecuación 2.5 toma los valores de V cuya derivada es menor del 1.3 % del valor corregido de la ecuación 2.1.

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
a_{i0}	0.54808	0.71041	0.16904	-1.52736
a_{i1}	5.00401	9.73491	1.85765	1.06745
a_{i2}	-10.43248	47.41496	18.96849	1.93229
a_{i3}	8.22992	-437.50962	-42.4318	3.89
b_{i1}	5	1.8	1.7	-0.84
b_{i2}	7	7.32	10	1.02
b_{i3}	9	22.8	14	13.4

Cuadro 2.1: Coeficiente para encontrar el parámetro V .

Usando el parámetro efectivo V en la ecuación 2.5, el índice efectivo de la envoltura n_{FSM} puede ser obtenido sin la necesidad de un cálculo complejo. La Figura 2.2 nos muestra a n_{FSM} como una función de λ/Λ y de d/Λ en un intervalo de 0.1 a 0.8 con pasos de 0.1, donde se muestran los resultados de la ecuación 2.1 y 2.5 con un $a_{\text{eff}} = \Lambda/\sqrt{3}$. Mortensen et al [9] propusieron una expresión para el n_{FSM} para encontrar directamente el índice de refracción de la envoltura, sin embargo los resultados no son tan precisos.

Por otra parte, la expresión 2.5 toma los valores de n_{FSM} , el cual se desvía en menos del 0.25 % de los valores obtenidos del vector del método de elementos finitos (FEM) desde $\lambda/\Lambda \leq 1,5$ y $V \geq 0,85$. Como en la referencia [6], de la ecuación 2.5, la condición de corte está dada por el valor de $V=2.405$, como en la fibra óptica convencional, es decir que cuando el valor V es menor de 2.405 hablamos de una fibra monomodo y cuando es mayor a este valor la fibra se vuelve multimodo.

Usando la expresión de la ecuación 2.5 y varias fórmulas en términos del parámetro V para fibras convencionales, podemos saber fácilmente las propiedades fundamentales de las fibras de cristal fotónico, tales como el diámetro del modo, la divergencia del haz, las pérdidas por empalme, etc [6].

En resumen, en este método lo que se hace es encontrar una ecuación y se la analiza a través un método numérico para encontrar sus coeficientes (el cual se muestra en el Cuadro 2.1).

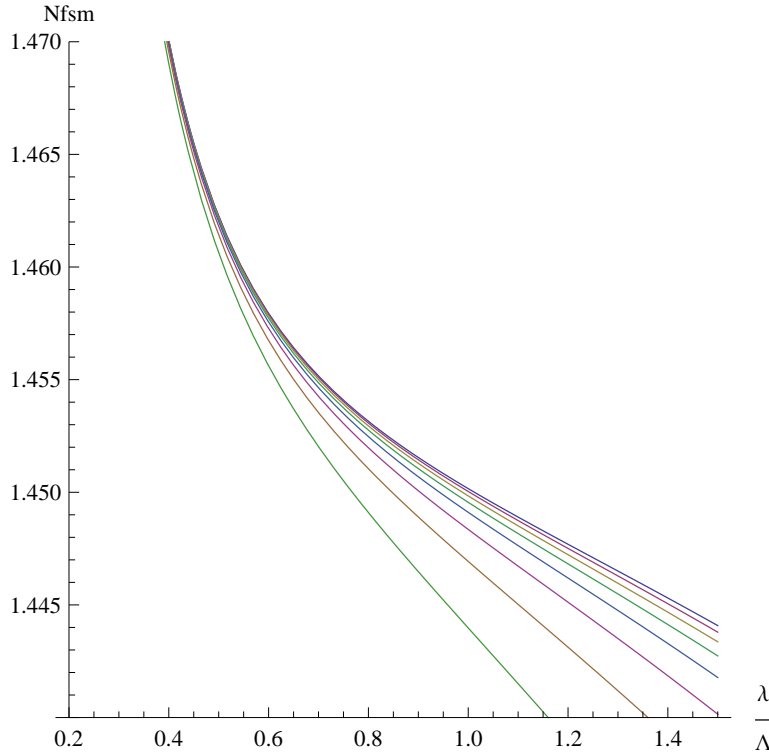


Figura 2.2: Índice de refracción efectivo de la envoltura con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ que van desde 0.1 hasta 0.8

2.2. La Expresión para el Parámetro W

En la sección anterior se ha proporcionado la relación para el parámetro V en las fibras de cristal fotónico. Usando la ecuación 2.5 se puede obtener fácilmente el índice de refracción de la envoltura n_{FSM} , pero, normalmente se necesita un cálculo numérico computacional bastante pesado para obtener

los valores exactos de n_{eff} en la ecuación 2.3. Sería más conveniente tener una relación para el parámetro W de las fibras de cristal fotónico.

Nielsen y Mortensen reportaron la relación para el parámetro W [8]. No es posible obtener el valor de n_{eff} solo del parámetro W , por lo tanto se necesita obtener el parámetro n_{eff} de los parámetros V y W .

En la Figura 2.3 se muestran los valores calculados de W [5] como una función de λ/Λ para diferentes d/Λ en un rango de 0.1 a 0.8 con pasos de 0.1. Se busca cada dato de la Figura 2.3 que puede ser encontrado por la misma función de la ecuación 2.5 como la función 2.7:

$$W\left(\frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda}\right) = B_1 + \frac{B_2}{1 + B_3 \exp(B_4 \lambda/\Lambda)} \quad (2.7)$$

Los resultados se muestran en las curvas de la Figura 2.3. Para obtener una mayor precisión los datos se toman para intervalos de $W=0.1$. Los parámetros buscados de la ecuación 2.7 se encuentran a través de los parámetros B_i (fórmula 2.8) de $i=1 \dots 4$. Dicha función depende de d/Λ solamente.

$$B_i = c_{i0} + c_{i1} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i1}} + c_{i2} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i2}} + c_{i3} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i3}} \quad (2.8)$$

Los coeficientes c_i y d_i se muestran en el Cuadro 2.2:

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
c_{i0}	-0.0973	0.53193	0.24876	5.29801
c_{i1}	-16.70566	6.70858	2.72423	0.05142
c_{i2}	67.13845	52.04855	13.28649	-5.1830
c_{i3}	-50.25518	-540.66947	-36.80372	2.7641
d_{i1}	7	1.49	3.85	-2
d_{i2}	9	6.58	10	0.41
d_{i3}	10	24.8	15	6

Cuadro 2.2: Coeficiente para encontra el parámetro W .

Para $\lambda/\Lambda \leq 2$ y $\geq 0,1$ la expresión de la ecuación 2.7 toma los valores de W con una desviación menor del 0.015 de los valores correctos obtenidos en la ecuación 2.3.

Usando el parámetro V en la ecuación 2.5 y el parámetro W en la ecuación 2.7, el índice de refracción efectivo del modo fundamental n_{eff} puede ser

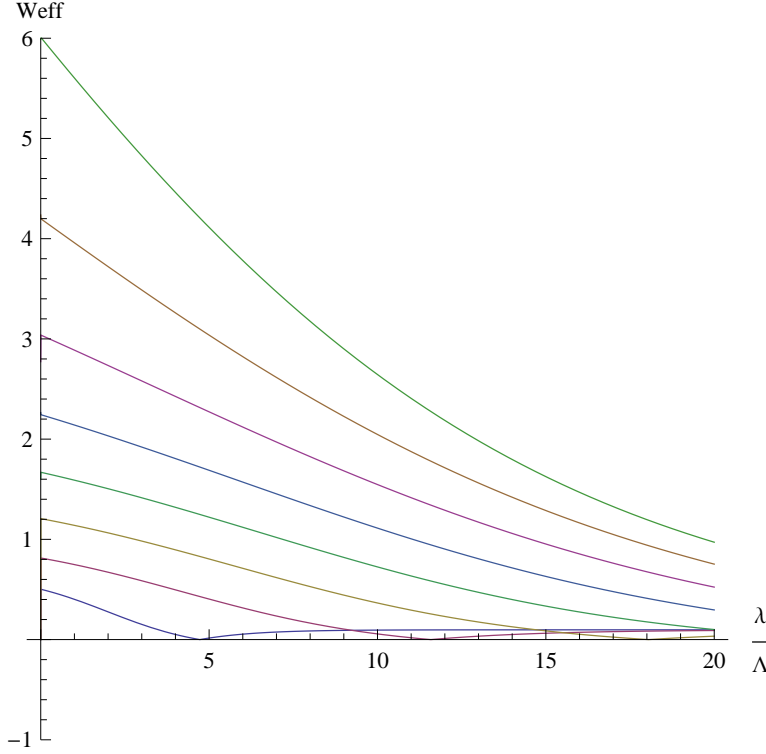


Figura 2.3: Relación del parámetro W con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ (desde 0.1 hasta 0.8)

obtenido sin la necesidad de un cálculo numérico.

La Figura 2.4 muestra el n_{eff} como una función de λ/Λ para los d/Λ en un rango de 0.1 a 0.8 con pasos de 0.1, donde las funciones nos muestran los resultados numéricos, las cuales se calculan a través de las ecuaciones 2.1, 2.3, 2.5 y 2.7 con $a_{\text{eff}} = \Lambda/\sqrt{3}$. Para $\lambda/\Lambda \leq 1.5$ y $W \geq 0.1$ las expresiones de las ecuaciones 2.5 y 2.7 toman los valores de n_{eff} , los cuales tienen una desviación menor que el 0.15% de los valores obtenidos a través del método de elementos finitos, es decir que el máximo error que se obtiene con este método con respecto al método de los elementos finitos es de un 0.15%.

Los gráficos obtenidos en las Figuras 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 se obtienen a partir de un programa que se elaboró con ayuda del software Wolfram Mathematica, el cual se muestra en el apéndice A.

Consecuentemente, usando las relaciones presentadas en las ecuaciones 2.5

y 2.7, calculamos la dispersión cromática en las fibras microestructuradas. Con el fin de usar los datos universales para el índice de refracción efectivo, la contribución al parámetro de dispersión D depende de la dispersión del material, como se muestra en la ecuación 2.9 [6].

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} + D_m \quad (2.9)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y D_m se obtiene de la relación de Sellmeier. La Figura 2.5 muestra el parámetro de dispersión D como una función de la longitud de onda para d/Λ en un rango de 0.1 a 0.8 con pasos de 0.1, donde el índice de refracción del sílice es de 1.45, el cual se indica como $n_{\text{co}} = 1.45$.

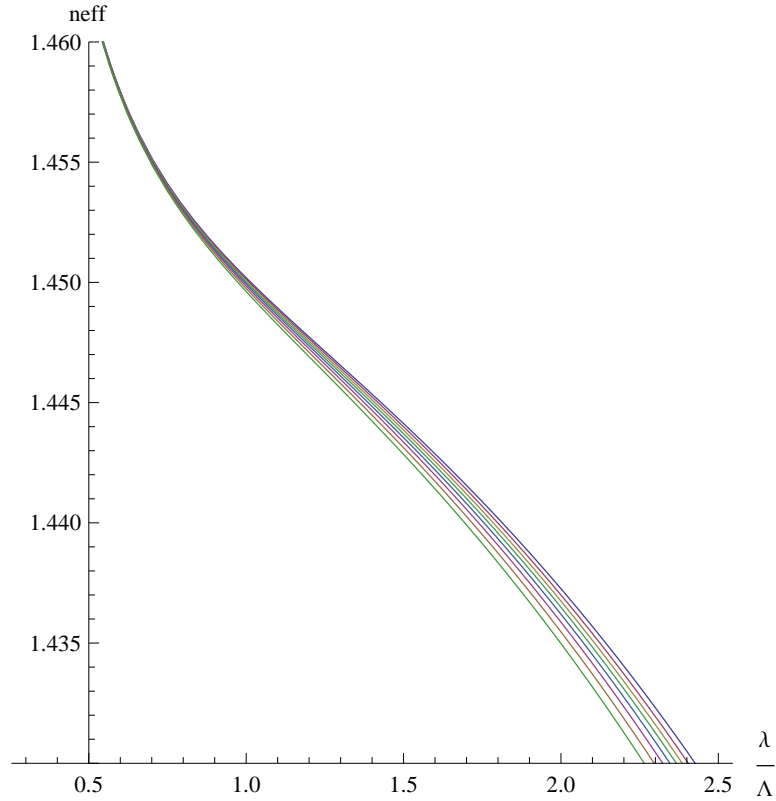


Figura 2.4: Índice de refracción efectivo de la envoltura con respecto a λ/Λ para diversos valores de d/Λ

Los resultados basados en las relaciones de las ecuaciones 2.5 y 2.7 coinciden

con los resultados numéricos obtenidos por el método de elementos finitos. En la referencia [6], la dispersión cromática de las fibras microestructuradas se calcula usando la fórmula de Gloge (ver más adelante) [10] y los valores de V , mientras que, aquí, las expresiones de las ecuaciones 2.5 y 2.7 son usadas por cálculo directo de la dispersión cromática.

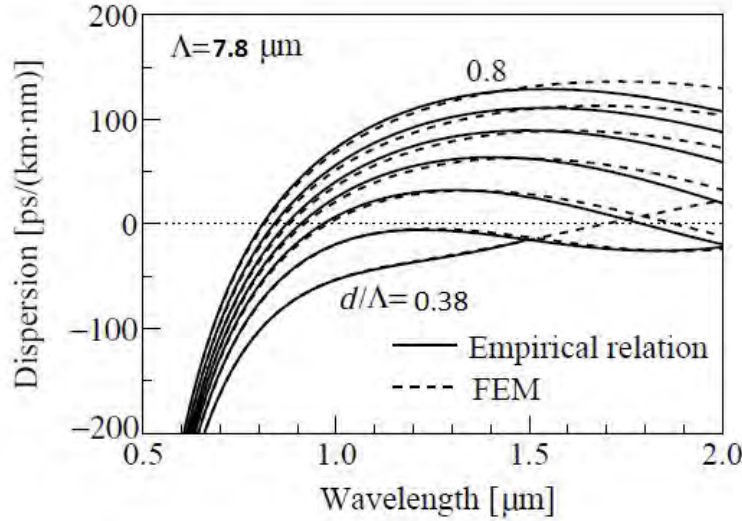


Figura 2.5: Dispersión cromática en función de la longitud de onda. Las líneas continuas indican los resultados de este método y las punteadas del método de los elementos finitos

Al diseñar una fibra, uno de los aspectos más importantes es que la relación de λ/Λ con respecto a d/Λ debe estar dentro de la región de modos simple o monomodo, normalmente cuando la relación d/Λ es menor que 0.4, se habla de una fibra monomodo. Esta relación se puede observar en la Figura 2.6.

La longitud de onda de corte obtenida de la ecuación de $V_{\text{eff}}=2.405$, basada en la fibra óptica convencional coincide bastante bien con los resultados experimentales anteriores publicados por otros grupos y los resultados de la simulación basada en el método de elementos finitos. El método de elementos finitos se abrevia como FEM y la fibra convencional como SIFA en la Figura 2.6.

Ahora, aplicaremos varias expresiones en los términos del parámetro V que había sido creado para las fibras convencionales para así poder investigar los parámetros de la fibra microestructurada.

Primero evaluamos los índices de refracción efectivo n_{eff} con la ayuda de la

fórmula 2.10 de Gloge [10]:

$$b_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{FSM}}^2}{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{FSM}}^2} \quad (2.10)$$

Donde b_{eff} es la constante normalizada efectiva de propagación. Sorprendentemente, los resultados de esta ecuación, basada en la fibra óptica convencional coinciden con los valores numéricos obtenidos por el método de elementos finitos (FEM) no solamente para el índice de refracción efectivo, sino también para el parámetro de dispersión, especialmente para valores de longitud de onda corta.

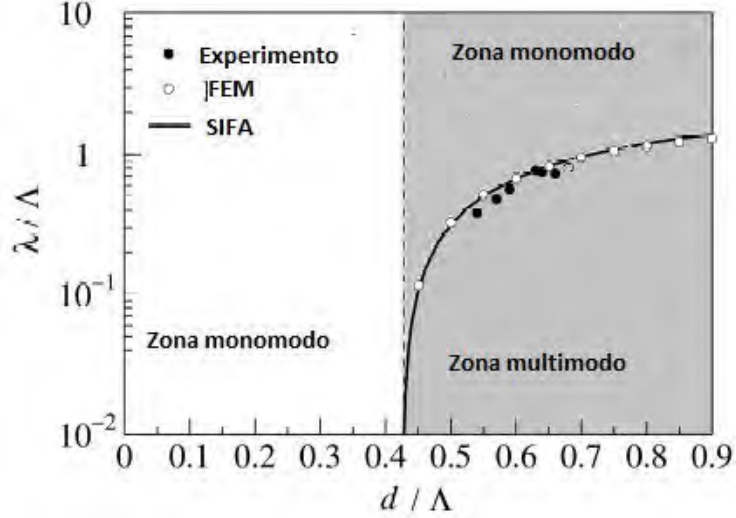


Figura 2.6: Datos de la relación de λ/Λ con respecto a d/Λ , para encontrar las zonas monomodo y multimodo

Como siguiente punto se calcula el diámetro del campo modal a través de la fórmula de Marcuse 2.11:

$$\frac{w_{\text{eff}}}{a_{\text{eff}}} = 0,65 + \frac{1,619}{V_{\text{eff}}^{3/2}} + \frac{2,879}{V_{\text{eff}}^6} \quad (2.11)$$

Donde w_{eff} es la mitad del diámetro del campo modal (MFD) y se denomina como el tamaño del modo efectivo. Conociendo el diámetro del campo modal (MFD), la teoría de la propagación Gaussiana establece que la divergencia del haz θ y las pérdidas por empalmes a_s entre una fibra microestructurada

y una fibra convencional se da en base a las siguientes relaciones (2.12 y 2.13):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\lambda}{\pi w_{\text{eff}}} \quad (2.12)$$

$$a_s = -20 \log_{10} \frac{2 w_{\text{eff}} w_{\text{SMF}}}{w_{\text{eff}}^2 + w_{\text{FSM}}^2} \quad (2.13)$$

Donde w_{SMF} es el tamaño de la mancha modal del SMF.

En conclusión, es posible demostrar las propiedades de la fibra estructurada, tales como el índice de refracción efectivo, el parámetro de dispersión, el diámetro del campo modal, la divergencia del haz, pérdidas por empalme, pueden ser comprendidas a partir del parámetro efectivo V , que se presenta en la ecuación 2.5. La cual está basada en una aproximación escalar, con la ventaja de utilizar fórmulas clásicas que no requieren cálculos pesados.

2.3. Resultados Numéricos

En base a todas las fórmulas expuestas en este capítulo, se ha elaborado un programa en Matlab, a través del cual se puede obtener automáticamente el gráfico de la dispersión con respecto a la longitud de onda y la longitud de onda para la cual la dispersión es igual a cero, en base a solamente dos parámetros, como se había expuesto antes, que son: la distancia entre los centros de los capilares Λ y el diámetro interno de cada capilar d .

En la parte de diseño se ha propuesto fabricar dos fibras estructuradas (ver capítulo 3), una de 4 capas de capilares hexagonales alrededor del núcleo sin los capilares angulares, y otra fibra con 5 capas de capilares alrededor del núcleo sin los capilares angulares.

Para la fibra 1, se han obtenido los valores distancia entre los centros de los capilares $\Lambda = 12,08875 \mu\text{m}$ y el diámetro interno de cada capilar de $d = 4.593725 \mu\text{m}$, esto en base a los resultados del diseño realizado en el capítulo 3 y teniendo en cuenta que el diámetro de la preforma para convertirse en fibra se reduce de 20 mm a 0.125 mm.

Para la fibra 1 de cuatro capas se ha elaborado el Cuadro 2.3, en la que se muestran los resultados de los parámetros $A(i)$, basados en la fórmula 2.6,

i	$A(i)$	V	$B(i)$	W	n_{eff}	n
1	0.5772	2.0902	-0.1085	1.4751	1.446991	1.4476
2	2.4561		2.2081			
3	0.5288		0.3153			
4	1.599		2.1767			

Cuadro 2.3: Resultados del cálculo de la primera fibra

n_{FSM}	n_{eff}	V_{eff}	W_{eff}	$\Theta(grades)$	A_s
1.446386	1.44699101	2.554971	7.37574	3.07134	0.934139 dB

Cuadro 2.4: Resultados de los cálculos de ángulo de divergencia para la primera fibra

después de lo cual se encuentra el parámetro V, en base a la fórmula 2.5, y de la misma forma se encuentran los parámetros B(i), basados en la fórmula 2.8, para después encontrar el parámetro W, en base a la fórmula 2.7. El índice de refracción n del material se lo encuentra en base a la ecuación de Sellmeier, ver fórmula 2.14, y se encuentra el índice de refracción efectivo n_{eff} , en base a las fórmulas 2.1, 2.3. En base a la fórmula 2.9 a través del programa antedicho se ha establecido que para no tener nada de dispersión en la fibra la longitud de onda de trabajo debe ser de $\lambda = 1,2433\mu\text{m}$.

En base a los datos obtenidos anteriormente ahora se calcula el parámetro w_{eff} dado por la fórmula 2.11, el ángulo de divergencia θ dado por la fórmula 2.12 y el parámetro a_s dado por la fórmula 2.13, y estos resultados se muestran en el Cuadro 2.4.

Para la segunda fibra, se han obtenido los valores de distancia entre los centros de los capilares $\Lambda = 9,75625\mu\text{m}$ y el diámetro interno de cada capilar de $d = 3,7075\mu\text{m}$, esto en base a los resultados del diseño realizado en el capítulo 3 y teniendo en cuenta que el diámetro de la preforma para convertirse en fibra se reduce de 20 mm a 0.125 mm.

i	$A(i)$	V	$B(i)$	W	n_{eff}	n
1	0.5772	2.0685	-0.1085	1.4522	1.4468	1.4477
2	2.4561		2.2081			
3	0.5288		0.3153			
4	1.599		2.1767			

Cuadro 2.5: Resultados del cálculo de la segunda fibra

n_{FSM}	n_{eff}	V_{eff}	W_{eff}	Θ (°C)	A_s (dB)
1.44591344	1.446794277	2.5152845	6.0114057	3.727	0.3073

Cuadro 2.6: Resultados de los cálculos de ángulo de divergencia para la segunda fibra

Para la segunda fibra, la cual cuenta con cinco capas se ha elaborado el Cuadro 2.5 en la que se muestran los resultados de los parámetros A(i), basados en la fórmula 2.6, después de lo cual se encuentra el parámetro V, en base a la fórmula 2.6, y de la misma forma se encuentran los parámetros B(i), basados en la fórmula 2.8, para después encontrar el parámetro W, en base a la fórmula 2.7.

Se encuentra el índice de refracción n del material en base a la ecuación de Sellmeier, y el índice de refracción efectivo n_{eff} , se lo encuentra en base a las fórmulas 2.1 y 2.3. A través del programa antedicho se ha establecido que para no tener nada de dispersión en la fibra la longitud de onda de trabajo debe ser de: $\lambda = 1,2302\mu\text{m}$ (ver fórmula 2.9).

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (2.14)$$

En base a los datos obtenidos anteriormente ahora se calcula el parámetro w_{eff} dado por la fórmula 2.11, el ángulo de divergencia θ dado por la fórmula 2.12 y el parámetro a_s dado por la fórmula 2.13, y estos resultados se muestran en el Cuadro 2.6.

Para el cálculo automatizado de todos estos parámetros se ha elaborado un programa (o base de cálculo) en el software Wolfram Mathematica, el cual se encuentra en el apéndice B.

También se ha elaborado un programa en base a todo lo expuesto en este capítulo y la fórmula 2.9, puede graficar y encontrar el punto de cero dispersión, este programa se puede observar en el apéndice C.

En base al programa del apéndice C, se ha encontrado que para el primer caso (fibra con cuatro capas) se obtiene la Figura 2.7, en el que se puede observar la longitud de onda para la cual la dispersión es cero.

Y por último se ha elaborado un programa que realiza el proceso contrario, en base a la longitud de onda que se le introduzca este calcula la relación denominada pitch o Λ , el código de este programa se muestra en el Apéndice D.

De la misma forma, en la Figura 2.8 se puede observar el gráfico de la dispersión para el segundo caso (fibra de cinco capas), y también se indica la longitud de onda para la cual la dispersión es cero.

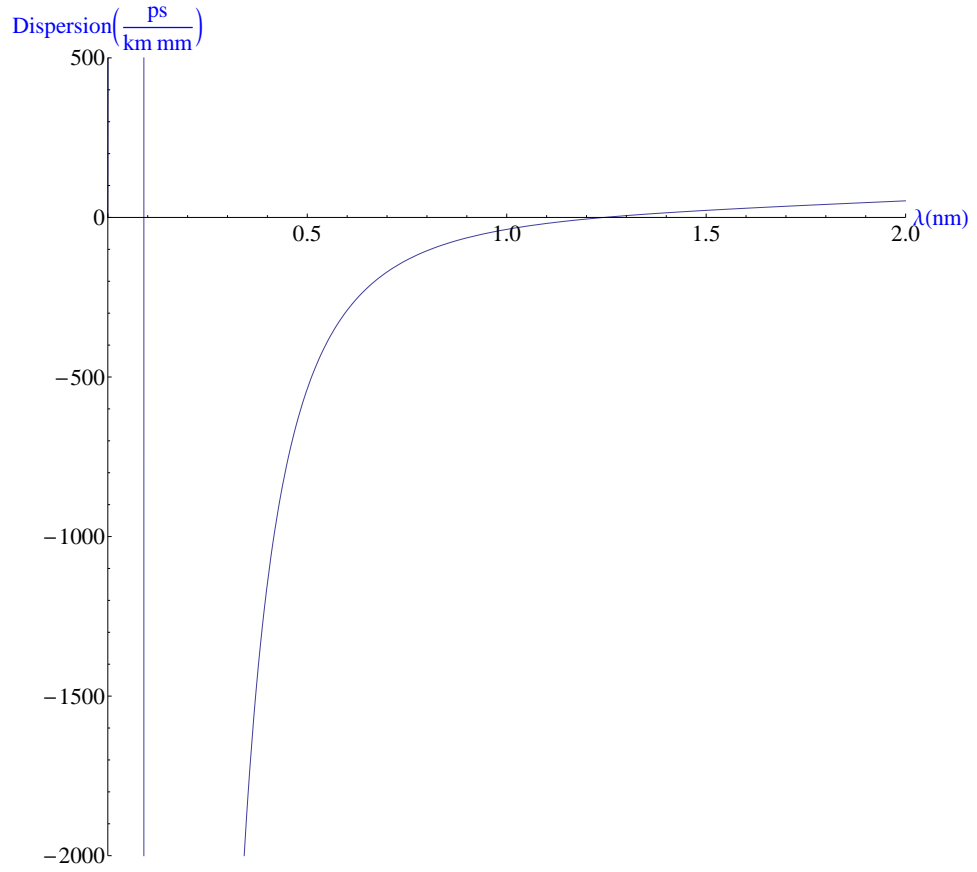


Figura 2.7: Gráfico de dispersión para una PCF de cuatro capas, la longitud de onda para la cual se tiene cero dispersión es de 1.2433 micrómetros

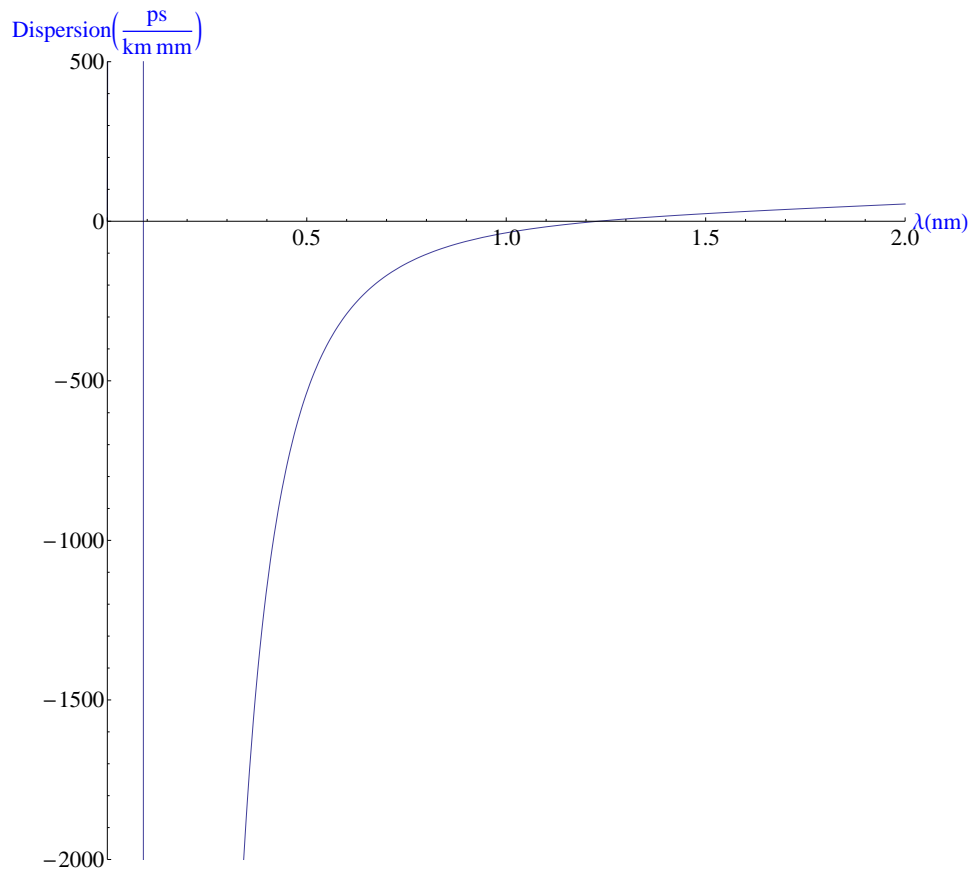


Figura 2.8: Gráfico de la dispersión para una PCF de cinco capas, la longitud de onda para la cual se tiene cero dispersión es de 1.2302 micrómetros

Bibliografía

- [1] P. Russell. Photonic crystal fibers. *Science*, 299(5605):358–362, 2003.
- [2] S.G. Johnson and J.D. Joannopoulos. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis. *Optics Express*, 8(3):173–190, 2001.
- [3] T.P. White, B.T. Kuhlmeiy, R.C. McPhedran, D. Maystre, G. Renversez, C.M. De Sterke, and L.C. Botten. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation. *Journal of the Optical Society of America B*, 19(10):2322–2330, 2002.
- [4] M. Koshiba. Full-vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method. *IEICE Trans. Electron.*, E85-C(4):881–888, 2002.
- [5] K. Saitoh and M. Koshiba. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: Application to photonic crystal fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38(7):927–933, 2002.
- [6] M. Koshiba and K. Saitoh. Applicability of classical optical fiber theories to holey fibers. *Optics Letters*, 29(15):1739–1741, 2004.
- [7] T.A. Birks, J.C. Knight, and P.S.J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Optics letters*, 22(13):961–963, 1997.
- [8] M. Nielsen and N. Mortensen. Photonic crystal fiber design based on the V-parameter. *Optics Express*, 11(21):2762–2768, 2003.
- [9] N.A. Mortensen, M.D. Nielsen, J.R. Folkenberg, A. Petersson, and H.R. Simonsen. Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers. *Optics Letters*, 28(6):393–395, 2003.
- [10] D. Gloge. Weakly guiding fibers. *Applied Optics*, 10(10):2252–2258, 1971.

CAPÍTULO 3

ESTIRAMIENTO DE LAS FIBRAS DE CRISTAL FOTÓNICO

En este capítulo se describirá en detalle el proceso de preparación, apilamiento y estiramiento de las fibras de cristal fotónico, empezando por la fabricación de cada una de las barras y los capilares de diferentes diámetros, seguido por el correspondiente apilamiento en base al diseño de la fibra y la fabricación o estiramiento de la misma.

3.1. Diseño de la Fibra

Se conocen los parámetros de la fibra tales como:

- distancia entre los centros de los capilares
- diámetro del agujero hueco o capilar
- número de capas o anillos hexagonales concéntricos alrededor del núcleo
- diámetro externo de cada capilar

Se tiene una idea de la sensibilidad de nuestra fibra en base a las variaciones de estos parámetros. Se necesita buscar los parámetros de la preforma macroscópica que satisfagan las necesidades requeridas después de que sea estirada o escalada a las dimensiones de una fibra microscópica, y:

- se tiene una cantidad limitada de tubos de vidrio
- se tiene preformas con tamaños limitados
- existe un rango limitado de tamaños de tubos que se pueden manipular, inferiores a los cuales es prácticamente imposible de acomodar en la preforma.

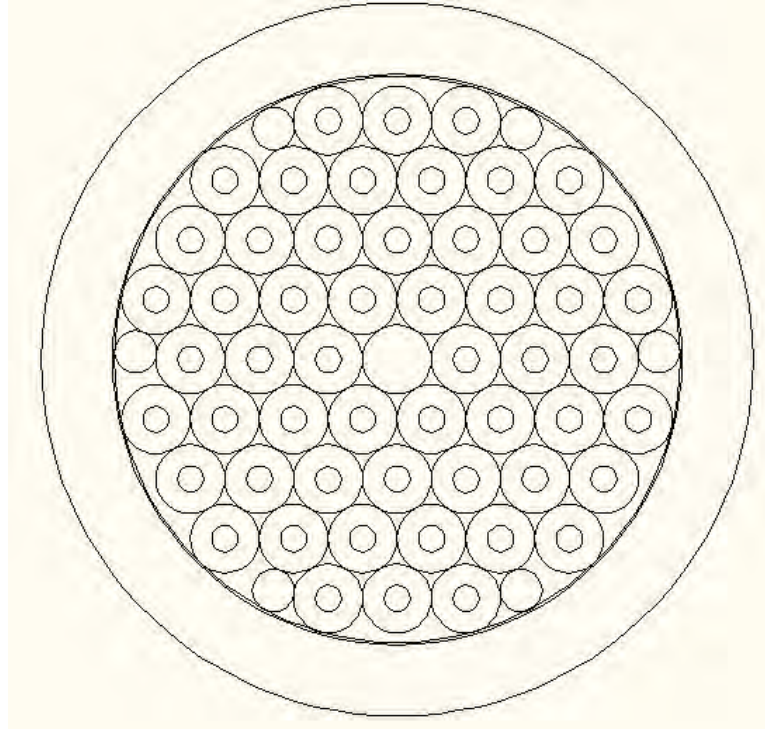


Figura 3.1: Diseño de la fibra óptica de cristal fotónico de cuatro capas

De esta forma, el diseño es un componente entre la fibra deseada, los materiales existentes y la practicidad de su fabricación.

Entonces como se ha dicho antes, el diseño de la fibra se realiza en base a los parámetros que se quieren obtener, como son: el diámetro de los capilares d , la distancia entre los centros de los capilares y el número de capas hexagonales, luego de lo cual se realiza el diseño de la fibra en el programa autocad dependiendo del tipo de fibra que se quiere obtener, en el presente caso se pretende fabricar dos diferentes fibras de cristal fotónico, la primera de 4 capas, sin el capilar angular, y la segunda de 5 capas sin el capilar angular.

Para el primer y el segundo caso las dimensiones de las preformas se muestran en el cuadro 3.1.

Donde $d_{int.}$ es el diámetro interno de los capilares y $d_{ext.}$ es el diámetro externo de los capilares, y $D_{int.}$, $D_{ext.}$ son los diámetros interno y externo de la preforma correspondientemente.

Preforma	d int.	d int./d ext.	Λ	D ext.	D int.
1	0.764996	0.38	1.9342	20	16
2	0.5932	0.38	1.561	20	16

Cuadro 3.1: Dimensiones de la preforma para la primera y la segunda PCF. Unidades son mm en donde aplican.

En base a estos datos se obtuvo el diseño de la fibra, tal como se muestra en la Figura 3.1.

En base a los datos iniciales se realizó el diseño de la fibra de la Figura 3.1. Se puede observar que el nucleo se diseña con el mismo diámetro externo que los capilares, formando así capas exagonales.

Para evitar deformaciones y espacios vacios después del estiramiento de la fibra, se colocan tubos de relleno de diferentes diámetros.

En base a estos datos se obtuvo el diseño de la segunda fibra, tal como se muestra en la Figura 3.2.

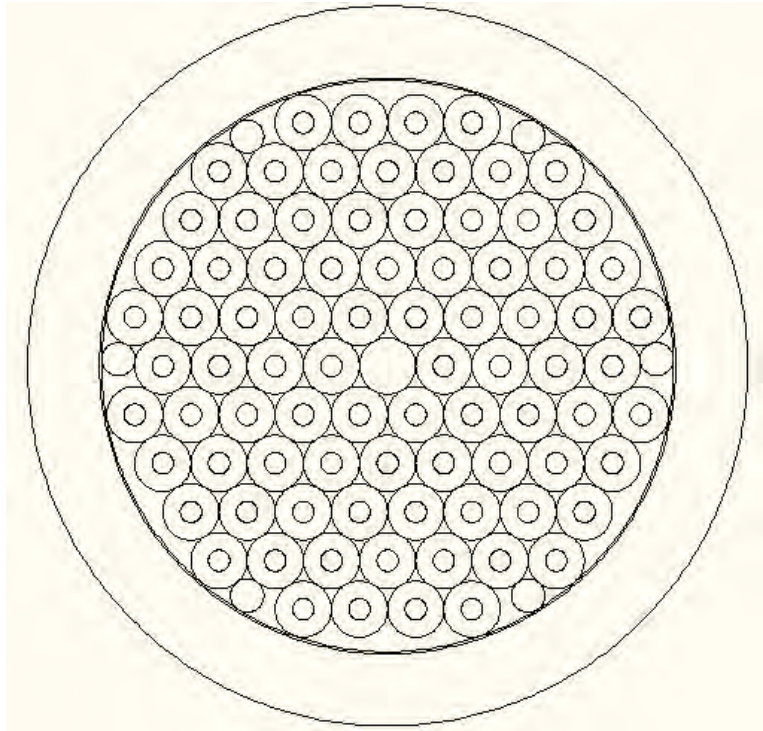


Figura 3.2: Diseño de la fibra óptica de cristal fotónico de cinco capas

Durante el proceso de diseño se deben eliminar los capilares que estén fuera del diámetro interno de la preforma, como se muestra en la Figura 3.3.

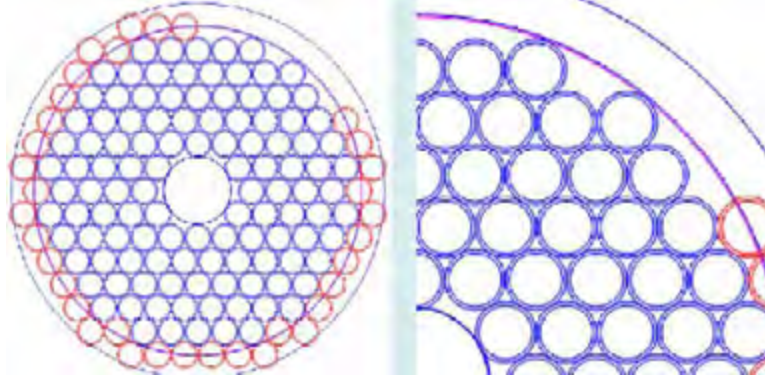


Figura 3.3: Capilares que exceden el límite interior de la preforma

Entre los capilares se coloca una barra cilíndrica, la cual se diseña tal como se muestra en la Figura 3.4.

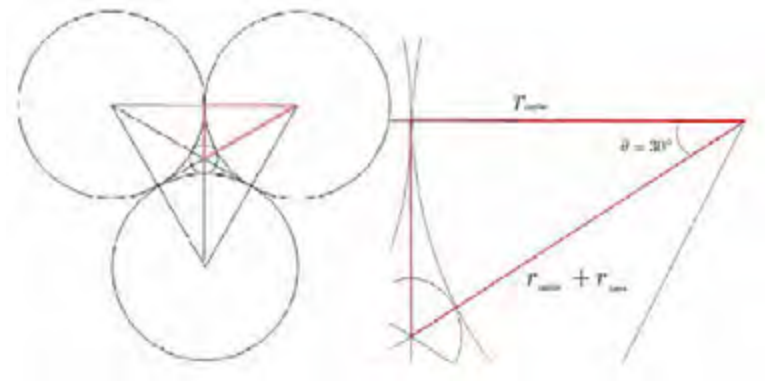


Figura 3.4: Forma geométrica para diseñar una posible barra entre los capilares

Por trigonometría se encuentra la siguiente relación matemática entre el radio del capilar y el radio de la barra, partiendo del triángulo de la Figura 3.4.

También se rellenan los espacios que quedan entre los capilares y la parte interior de la preforma con barras de diferente diámetro, como se muestra en la Figura 3.5.

Después de realizar el dibujo en el programa correspondiente (AutoCAD), se procede a medir los diámetros y la cantidad de barras de cada diámetro

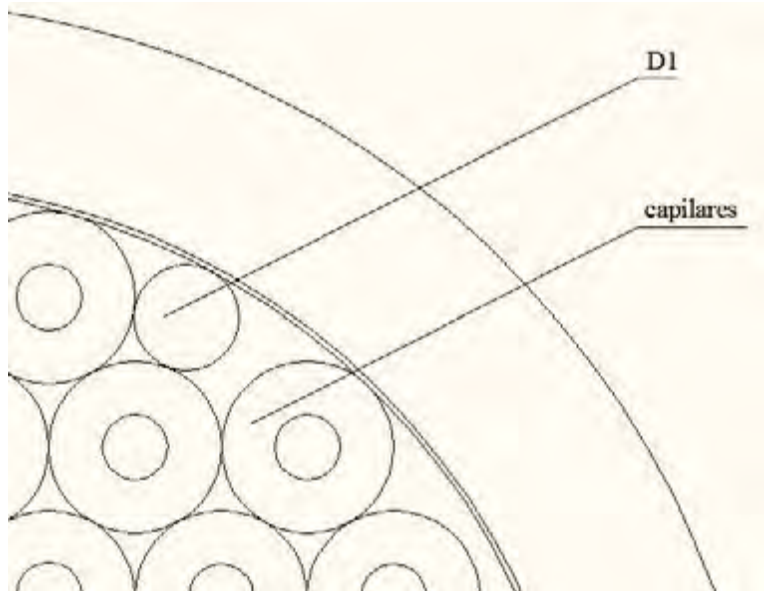


Figura 3.5: Barras de diferentes diámetros para rellenar los espacios libres

Diámetro de los capilares mm	Cantidad	Extras	Cantidad total
Diámetro interno= 0,7345 Diámetro externo= 1,9142	54	6	60
Núcleo = 1,9142	1	1	2
Barras $D_1 = 1,1833$	6	2	8

Cuadro 3.2: Datos del diámetro y cantidad de barras para la fibra de cuatro capas

para dicha fibra, en el Cuadro 3.2 se muestran los resultados del primer caso (fibra de cuatro capas) y en el Cuadro 3.3 se muestran los resultados del segundo caso (fibra de cinco capas).

3.2. Programa para Diseñar Fibras Ópticas de Cristal Fotónico

Se ha realizado un programa en Matlab, el cual tiene la capacidad de ordenar dentro de una preforma al núcleo y a los capilares, en dicho programa se introducen ciertos datos como son: el radio externo de la preforma, el radio interno de la preforma, el radio externo de cada capilar, y la relación de los

Diámetro de los capilares mm	Cantidad	Extras	Cantidad total
Diámetro interno= 0,5931 Diámetro externo= 1,561	84	6	90
$Núcleo = 1,561$	1	1	2
$D_1 = 0,9281$	6	2	8

Cuadro 3.3: Datos del diámetro y cantidad de barras para la fibra de cinco capas

radios externos e internos de cada capilar.

Para el tipo de fibras que se planea realizar (la fibra diseñada anteriormente) se han introducido todos los valores antedichos (ver código del programa en apéndice E) y después de correr el programa se ha obtenido el diseño de ambas fibras, la fibra de 4 capas que se muestra en la Figura 3.6 y la fibra de cinco capas como se muestra en la Figura 3.7.

Este programa aún no tiene la capacidad de calcular el tamaño ni la disposición de las barras de relleno, lo cual se planifica complementar más adelante.

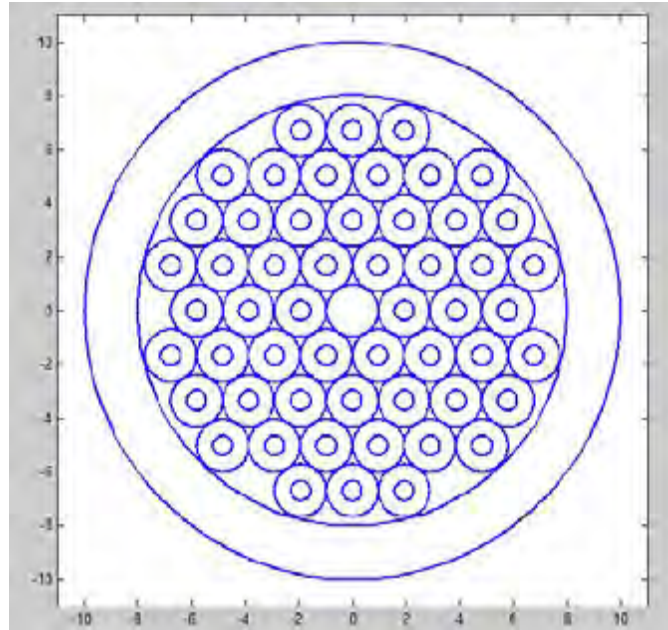


Figura 3.6: Diseño de una fibra de cuatro capas, elaborado automáticamente por el programa Matlab

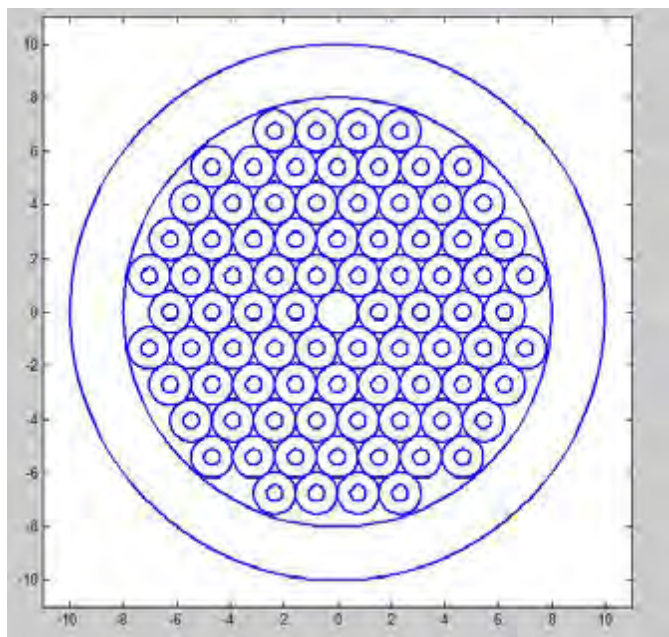


Figura 3.7: Diseño de una fibra de cinco capas, elaborado automáticamente por el programa Matlab

3.3. Fabricación de Capilares y Barras Cilíndricas de Relleno

En la parte práctica (fabricación) se realiza el estiramiento de los capilares de un determinado diámetro y de cada una de las barras cilíndricas de acuerdo a lo obtenido en el diseño y en la Tabla 3.1, la cantidad total obtenida de cada barra en la tabla es el valor en metros que se debe estirar, ya que la preforma tiene 1 metro de longitud.

Antes de empezar este proceso se debe limpiar la preforma cuidadosamente con alcohol y con la ayuda de pedazos de algodón para que no quede ningún residuo de otros materiales en la misma, después de limpiar la preforma se la debe unir por fusión en el torno a otra preforma, dicha operación se realiza debido a que el mecanismo que introduce lentamente la preforma en el horno de la torre de estiramiento no debe acercarse mucho a este horno, ya que se podría dañar debido a la alta temperatura. Esto se debe hacer tanto con las preformas tubulares, como en las preformas rellenas.

Durante el proceso de fabricación de los capilares se debe tener sumo cui-

dado en mantener constante el diámetro de estos. En el presente caso, fue imposible mantener al 100 por ciento constante dicho diámetro, sin embargo se logró que dichos cambios no fuesen significativos.

Se tuvieron muchos inconvenientes para fabricar los capilares, debido a que se tiene que mantener la relación d/Λ que se había calculado.

Una vez que se consiguió el diámetro y la relación adecuada, se procedió a cortar cada uno de los capilares en longitudes aproximadas de 120 cm.

Después que se fabricaron todos los tubos capilares idénticos, se llevó a cabo un procedimiento similar al anterior, pero ahora con una barra cilíndrica rellena (la cual no tiene agujero en su interior), de la misma forma se le limpia, se suelda con otra preforma y después se procede al estiramiento, empezando por la barra que servirá como núcleo de la fibra de cristal fotónico a fabricar, para lo cual se tiene que buscar el diámetro adecuado y estirar por lo menos 2 barras (una de reserva).

También se deben colocar estas barras en el dispositivo de descarga electrostática, anteriormente mencionado. Después se procedió a fabricar cada una de las pequeñas barras de relleno que se han diseñado y calculado anteriormente.

Una vez se tienen los capiles y las barras requeridas, se procede a verificar el diámetro de cada una de ellas con la ayuda de un micrómetro. Aquí hay que remarcar que toda la manipulación de capilares y barras se debe de realizar con guantes especiales para no contaminar a los mismos mediante el contacto con la piel.

3.4. Apilamiento de los Capilares y las Barras

Una vez fabricados todos los capilares y las barras, se procederá a ordenarlas, con la ayuda de un mecanismo especializado, este mecanismo tiene una estructura hexagonal, en la cual se acomodarán todos los capilares junto con las barras cilíndricas de relleno.

Primero se deben acomodar todos los capilares en esta estructura hexagonal, la cual se muestra en la Figura 3.8, colocando aquí capilares en los extremos para formar un hexágono perfecto de cuatro capas alrededor del núcleo (en realidad en el diseño no se cuenta con los capilares de los extremos, estos solo se colocan aquí temporalmente), se debe tener sumo cuidado al colocarlos

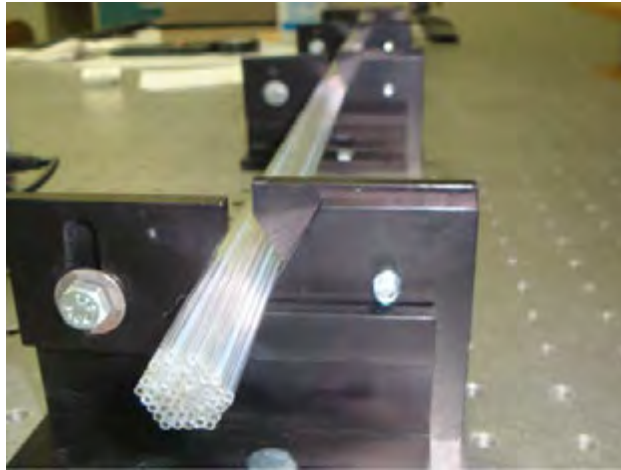


Figura 3.8: Mecanismo especial, donde se acomodan los capilares

para que quede todo a lo largo de los 115 cm muy bien acomodado, tal como se muestra en la figura 3.9.

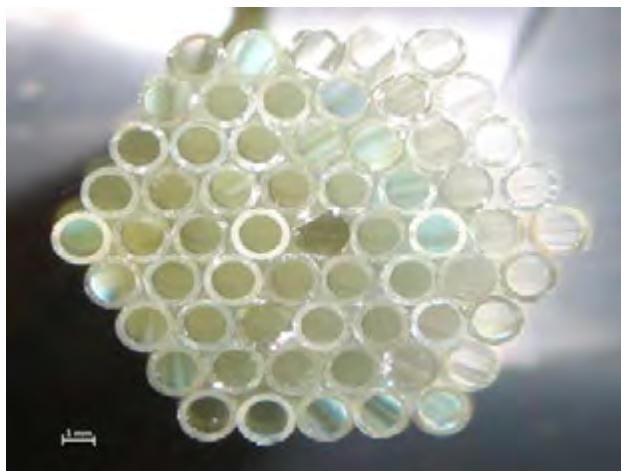


Figura 3.9: Capilares acomodados en el mecanismo especial, formando exágonos concéntricos alrededor del núcleo

Cuando se haya terminado de apilar los capilares, se debe amarrar con un hilo especial en 4 o 5 diferentes lugares todo este arreglo.

Después se debe retirar poco a poco cada uno de los capilares de los extremos, colocando las barras correspondientes según el diseño hasta que se obtiene el arreglo de capilares con las barras, como se muestra en la Figura 3.10,

observese que se obtuvo la misma forma que se presentó en el diseño.

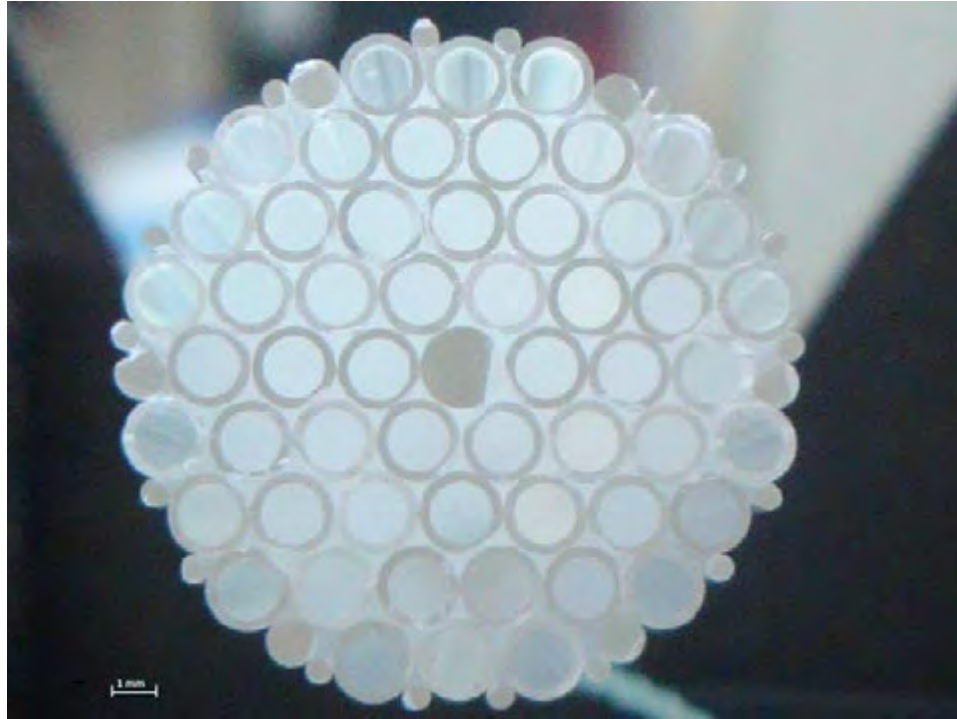


Figura 3.10: Fotografía de los capilares y las barras, listos para introducirse en la preforma. cristal fotónico

Y por último se procede a introducir todo este arreglo dentro de una preforma, previamente limpiada, ver Figura 3.11, para obtener al fin la preforma que será estirada posteriormente.

Cabe aclarar que tanto el tubo de la preforma como los capilares se fabrican del mismo material que en este caso es sílice. Estos tubos se compran fabricados.

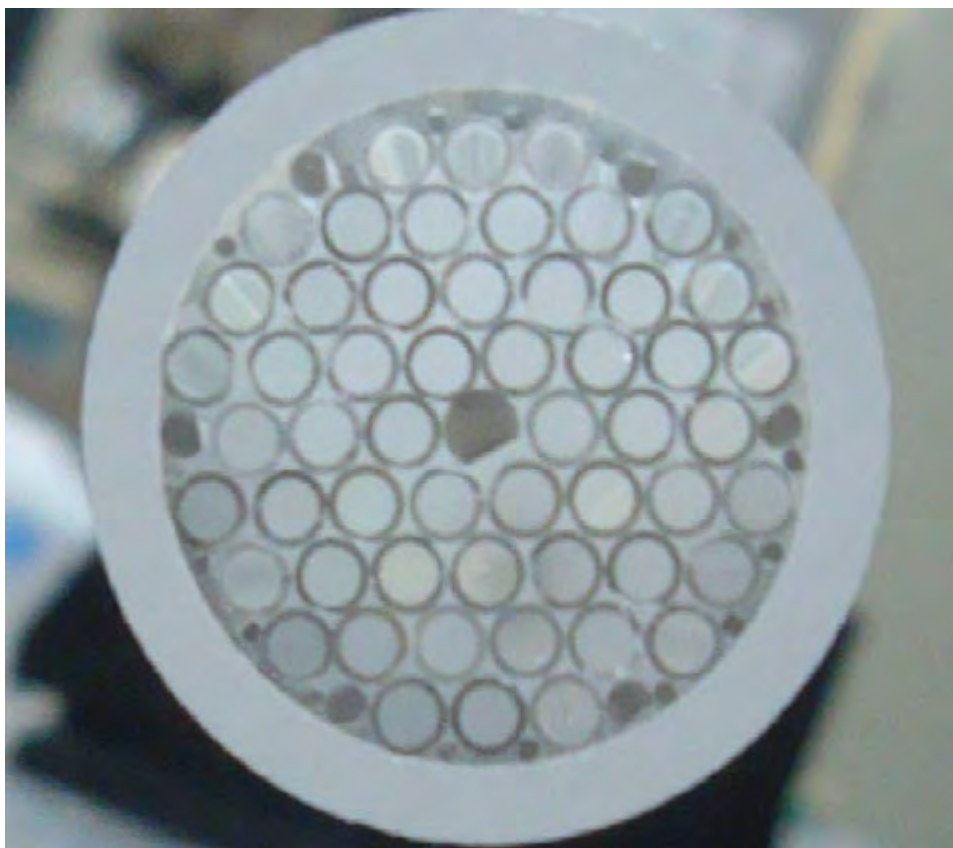


Figura 3.11: Fotografía de los capilares y las barras acomodados en el interior de una preforma, en base al diseño de la fibra de cristal fotónico

CAPÍTULO 4

RESULTADOS, MEDICIONES Y ANÁLISIS DE LA PCF

4.1. Resultados

En el proceso de estiramiento de la preforma para obtener la PCF diseñada se presentaron muchos problemas y desperfectos en los ajustes de la torre de estiramiento, esto conllevando a una serie de intentos fracasados de fabricar la PCF.

Cuando al fin se consiguieron solucionar algunos de estos problemas, se fabricó una fibra cuya envoltura o capa de protección externa no secó después de pasar por el proceso de fabricación. La envoltura se agrega después de estirar la fibra, con la ayuda de un recipiente que contiene este material. Dicho material pasa después por un dispositivo que ilumina a este con luz ultravioleta para secarlo. Este intento fue otro intento sin buenos resultados, ya que esta fibra quedaba pegada a toda superficie con la que tuviera contacto.

Después de varios intentos se consiguió fabricar la PCF deseada a partir de la preforma que se indica en el capítulo anterior (todos los intentos se realizaron con la misma preforma).

En este proceso se fabricaron 4 tipos de fibras diferentes: la primera a una temperatura de 1950°C y con una velocidad de estiramiento de la fibra de 15 m/min, a esta fibra se la denominó N6, la segunda fibra, la N10 a una temperatura de 1940°C y con una velocidad de estiramiento de la fibra de 16 m/min, la tercera fibra que es la N7 se le fabricó a una temperatura de 1930°C y con una velocidad de estiramiento de la fibra de 17 m/min y por último la cuarta fibra N9 a una temperatura de 1920°C y con una velocidad de estiramiento de la fibra de 18 m/min.

Cabe mencionar que por falta de tiempo solo se fabricó la fibra con cuatro

	Velocidad de estiramiento (m/min)	Temperatura °C
N9	18	1920
N7	17	1930
N10	16	1940
N6	15	1950

Cuadro 4.1: Parámetros de fabricación de las cuatro fibras

capas, pero de esta se han obtenido 4 variantes diferentes, que se mencionaron anteriormente. En el Cuadro 4.1 se indican los parámetros de cada una de estas cuatro fibras.

Todas las fibras fueron fabricadas bajo una velocidad máxima de estiramiento de aproximadamente 18 m/min, esta velocidad está limitada por la velocidad de secado del polímero de la envoltura. En la torre de estiramiento del CIO el sistema de UV es antiguo y se puede utilizar solamente al 30 por ciento de su potencia, por eso para velocidades mayores a 18 m/min. la fibra queda aún pegajosa, porque el polímero en el que se baña para recubrirla necesita más tiempo de curado.

4.2. Dimensiones Geométricas de las Fibras Fabricadas

Una vez fabricadas las fibras con los parámetros correspondientes, se realizaron las mediciones dimensionales.

En primera instancia estas mediciones se realizaron en un microscopio óptico, el cual tiene la opción de visualización a través de una computadora, de esta manera se tomaron fotografías para consecuentemente analizar las dimensiones de los diámetros de los capilares d , de las distancias entre los núcleos Λ y del diámetro del núcleo D .

Una vez tomados estos datos, se procedió a realizar las mismas mediciones en el microscopio de fuerza atómica MFA. Al comparar estos datos se notó que los valores no coincidían, sobre todo los valores de los diámetros de los capilares. Analizando el problema se llegó a pensar en posibles problemas de distorsión en el sistema del microscopio óptico, pero al ver con la ayuda de un retícula que tal distorsión no existía se llegó a la conclusión de que debido al hecho que la fibra se ilumina por su parte inferior (no se toma la

imagen por luz reflejada, sino por luz transmitida) posiblemente se trataba de difracción de la imagen.

En el microscopio de fuerza atómica (MFA) se midieron las dimensiones de los parámetros estructurales de la fibra óptica, como la distancia entre los centros o pitch Λ , el diámetro interno de cada capilar d , el diámetro del núcleo de la fibra $D_{\text{núcleo}}$, y el diámetro externo de la fibra $D_{\text{ext.}}$.

Debido a muchos factores que intervinieron en el proceso de fabricación tales como la falta de calibración de la torre, anomalías en su funcionamiento, etc. algunos de los capilares tomaron una forma levemente ovalada, como en el caso de los capilares que están alrededor del núcleo, y algunos disminuyeron sus dimensiones como en el caso de los capilares de la última capa, debido a que en esta zona la temperatura es mayor que en el centro, y existe más la tendencia a que estos colapsen.

Una de las fibras obtenidas en el estiramiento, donde se pueden observar todos estos efectos e imperfecciones se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1: Corte transversal de la Fibra de Cristal Fotónico con núcleo de gran área, fabricada en el CIO, vista bajo microscopio con objetivo de 40x

Las medidas de los diámetros de los capilares y de las distancias entre núcleos en la práctica no dan valores idénticos, por lo que se han calculado los promedios de estos valores, en base a las mediciones realizadas con el MFA, dichos valores se indican en el cuadro 4.2.

i	D can. aire	Λ	D ext.	D núcleo	d/Λ
N6	0.516	10.664	122.2	21.79	0.33
N10	3.5156	10.313	123.2	20.391	0.34
N7	4.1403	10.3125	122.87	20.156	0.40
N9	4.4533	10.4285	120.2	19.453	0.43
calculada	4.5937	12.08	125	-	0.38

Cuadro 4.2: Valores geométricos de las 4 PCF fabricadas. Unidades en μm .

Donde D can. aire es el diámetro de los canales de aire, D ext. es el diámetro de la fibra como tal y D núcleo es el diámetro del núcleo.

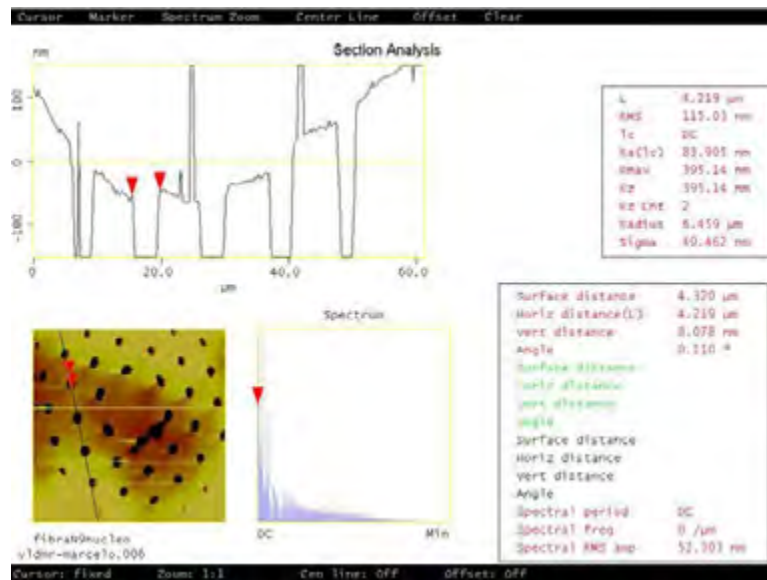


Figura 4.2: Información otorgada por el MFA

En el mismo cuadro 4.2 se pueden observar los valores precalculados para la fibra de 4 capas, según el diseño, de aquí se puede concluir que la PCF con resultados geométricos más similares a los calculados es la fibra N9, ya que el valor del diámetro de los capilares casi coincide con el obtenido en la realidad, sin embargo el valor de la distancia entre los núcleos tiene un poco más de variación con respecto a lo calculado.

También se puede observar que el diámetro exterior de la fibra es levemente inferior a las 125 micras calculadas, el motivo de fabricar las fibras con un diámetro aproximado de 123 micras, es con la intención de que en ningún

momento sobrepase el diámetro nominal de 125 micras, ya que en tal caso esta fibra no se podría utilizar en los diversos tipos de conectores.

En la figura 4.2 se puede observar la información dada por el MFA con las mediciones de diámetro interno de uno de los capilares. Esta se indica en la tabla de la derecha con el título de Horiz Distance (L).

4.3. Medición de la Apertura Numérica

La segunda medición que se realizó es la de la apertura numérica de las cuatro fibras fabricadas, para lo cual primero se procedió a montar el arreglo mostrado en la figura 4.3.

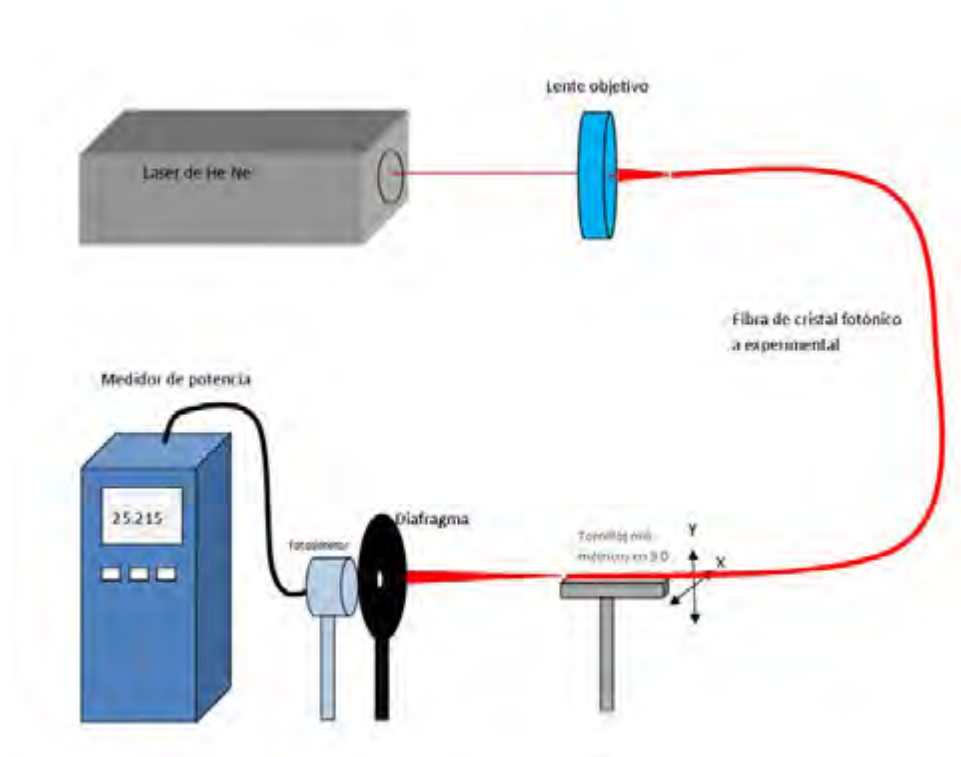


Figura 4.3: Arreglo para realizar la medición del ángulo de salida de la fibra

En el arreglo de la figura 4.3 tenemos un láser He-Ne cuya radiación incide sobre un objetivo, el cual concentra la luz dentro del núcleo de la fibra bajo

estudio, y a la salida de la fibra a una distancia determinada se colocó el fotodetector del medidor de potencia, en frente de este detector se colocó un diafragma, para después mover la fibra en sus dos diferentes ejes (X y Y) (La dirección de los ejes X y Y son perpendiculares al eje de la fibra y ortogonales entre si) y así obtener la función Gaussiana del haz luminoso que sale de la PCF.

Los resultados de estas mediciones se muestran en las siguientes figuras: La figura 4.4 muestra la Gaussiana de la fibra N6, la figura 4.5 corresponde a la función Gaussiana de la fibra N10, la figura 4.6 corresponde a la función Gaussiana de la fibra N7 y la figura 4.7 corresponde a la fibra N9.

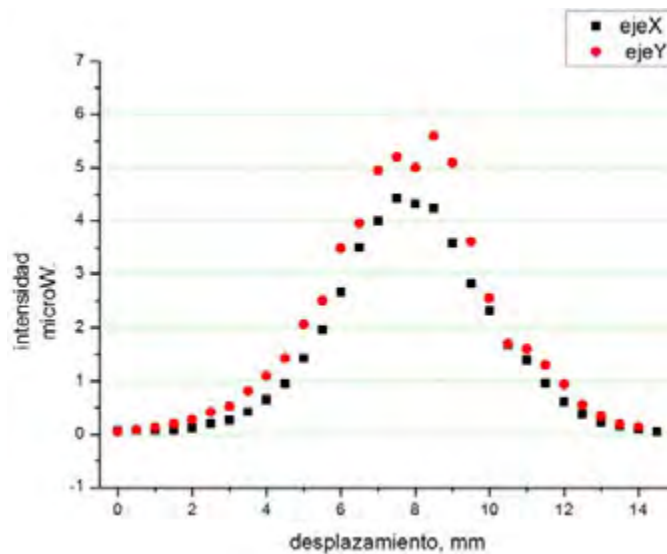


Figura 4.4: Función Gaussiana obtenida de la fibra N6, en los ejes X y Y respectivamente

Después de haber obtenido los datos de estas cuatro fibras y de haber diseñado los gráficos anteriores, se realizó la medición del ancho del haz incidente, tomando como punto inicial y final de la intensidad luminosa el 5 por ciento del valor máximo de la gaussiana, para después calcular el ángulo, en base a la distancia entre la fibra y el detector, la cual también fue medida, y de esta forma se obtuvieron las aperturas numéricas para las cuatro fibras, todos estos datos se muestran en el cuadro 4.3.

En base a los datos obtenidos en el cuadro 4.3, observamos que la fibra con apertura numérica más parecida al valor teórico calculado en el capítulo 2, es la fibra N6, aunque en realidad los valores de NA de las cuatro fibras son

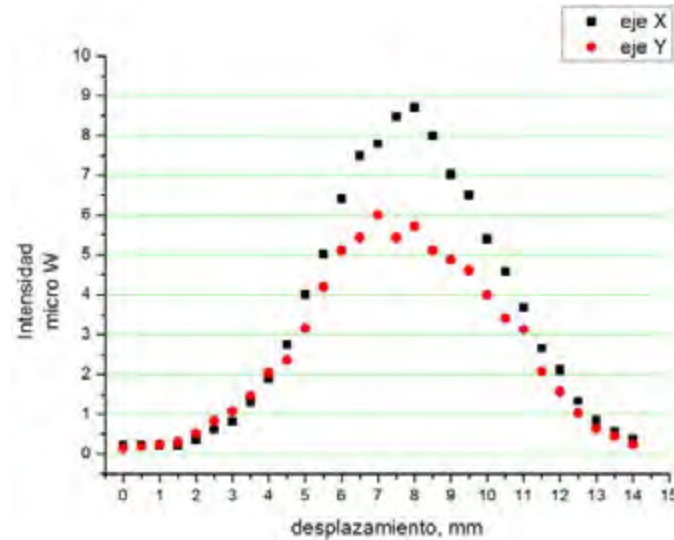


Figura 4.5: Función Gaussiana obtenida de la fibra N10, en los ejes X y Y respectivamente

i	D eje X	D eje Y	L fibra-det.	L fibra	ángulo[°]	NA
N6	10.5 mm	11 mm	180 mm	1.15 m	3.4177	0.03
N10	12 mm	12.5 mm	195 mm	1.4 m	3.5946	0.031
N7	12.5 mm	13.5 mm	202 mm	1.25 m	3.6823	0.032
N9	11 mm	12.5 mm	183 mm	2 m	3.6736	0.032
			por cálculo:			
			cuatro capas		3.07134	0.02679
			cinco capas		3.727	0.03252

Cuadro 4.3: Valores del ángulo del cono de entrada de la fibra y de la apertura numérica

muy similares, y están muy próximos al valor calculado.

También es posible observar la similitud de los resultados de las cuatro fibras fabricadas con los valores obtenidos por cálculo para la fibra de cuatro y cinco capas.

Con fines de comparación, se ha realizado el cálculo para cada una de las cuatro fibras obtenidas, en base al diámetro de los capilares y a la distancia entre ellos Λ obtenidos en la medición realizada en el MFA, y se ha obtenido en base a estos datos el ángulo de apertura, así como la apertura numérica teórica, en base a las fórmulas del capítulo 2.

Los datos obtenidos teóricamente (por fórmulas) y los datos obtenidos por

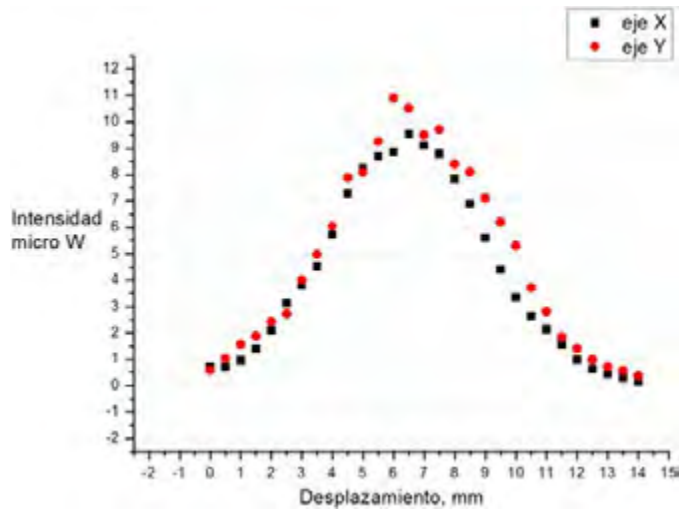


Figura 4.6: Función Gaussiana obtenida de la fibra N7, en los ejes X y Y respectivamente

medición, se muestran de forma comparativa en el cuadro 4.4.

i	ángulo (°)		error [%]	apertura numérica (NA)	
	teoría	experimento		teoría	experimento
N6	3.06741	3.4177	11.41	0.026765	0.02982
N10	3.24406	3.5946	10.805595	0.0283	0.03136
N7	3.68073	3.6823	0.04265	0.03211	0.03213
N9	3.82571	3.6736	3.976	0.03338	0.0320527

Cuadro 4.4: Comparación de los valores de resultados por cálculos y resultados obtenidos en la medición del ángulo del cono de luz de las PCF y de la apertura numérica

Todos los experimentos (para las cuatro fibras), se realizaron a una distancia entre el extremo de la fibra y el detector del equipo de medición de aproximadamente 18-20 cm. Se observa también en base a las gráficas y a los resultados que el diámetro en el eje Y es mayor que en el eje X, esto es debido a la geometría hexagonal que tiene el haz de salida, y esta geometría es provocada por la primera capa hexagonal que tienen las fibras microestructuradas.

En la figura 4.8 se muestra una fotografía tomada del haz de salida de una de las PCF fabricadas, allí se observa la estructura hexagonal antedicha.

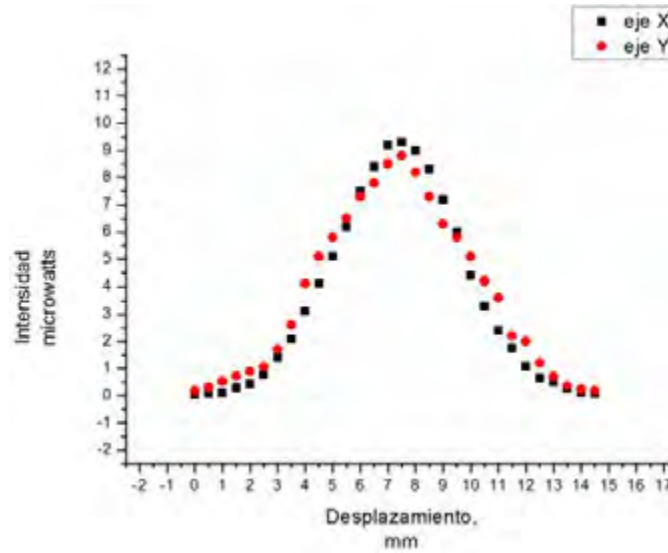


Figura 4.7: Función Gaussiana obtenida de la fibra N9, en los ejes X y Y respectivamente

4.4. Medición y Análisis de los Resultados de Atenuación

4.4.1. Niveles de Atenuación Reportados

Muchas de las PCF fabricadas, generalmente tienen pérdidas del orden de los 0.1 dB/m o sea 100 dB/km [1, 2]. Los valores de atenuación están ligados generalmente al diseño de la estructura, a la pureza del vidrio y a la limpieza del laboratorio donde se le fabrica.

En el año 2001 se reportó una atenuación de 3.2 dB/km a 1550 nm [3] y ya en el año 2002 llegaron al límite de 1 dB/km a 1550 nm [4]. Desde entonces se han reportado cada vez menores atenuaciones [5, 6] hasta llegar a los 0.28 dB/km a los 1550 nm [7]. El mejor avance que se ha obtenido ha sido usando un material altamente puro, con bajo contenido de OH en el sílice, fabricadas por el método de depósito por vaporización axial [6, 7].

4.4.2. Contaminación del Vidrio de Silice con OH

La contaminación generada por el hidroxilo OH es muy conocida en los procesos de fabricación de las fibras, en el grupo de los OH entra básicamente

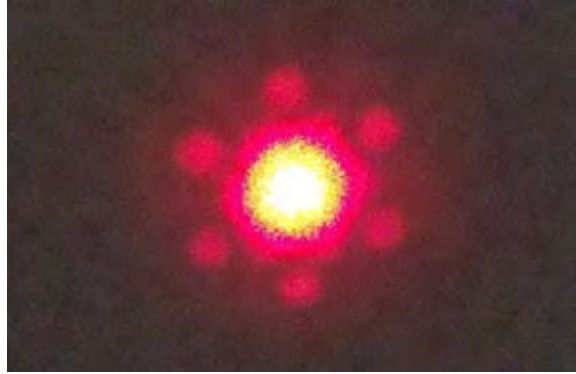


Figura 4.8: Fotografía tomada del haz de salida de una de las fibras de cristal fotónico fabricadas en el CIO

el H_2O , y el óxido de Silicio SiO_2 , así como el $SiOH$. Los cuales en altas concentraciones provocan que el vidrio llegue al punto de cristalización, viscosidad, así como fatiga del material [8].

Cuando se tiene una concentración normal del orden de pocas ppm, el primer efecto es una gran absorción a una longitud de onda de 2.73 micrómetros. Normalmente esto no afecta mucho ya que esta longitud de onda se encuentra fuera del rango de transparencia del sílice.

La razón por la cual se debe evitar la contaminación por moléculas OH es porque la absorción fundamental se da a bajas longitudes de ondas, las absorciones mas relevantes están a 1383, 1246 y 943 nm de longitud de onda [9] y es importante su nivel ya que puede afectar a la atenuación que se da a los 1550 nm.

El valor de la atenuación contribuida por este factor a 1550 nm es solamente del 0.5-1 por ciento del valor máximo del pico, que está a 1383 nm [10]. Esta contribución aumenta con el incremento del Germanio [11]. Para que las moléculas de OH no afecten a la atenuación a una longitud de onda de 1550 nm, esta no debe sobrepasar las 20 ppm.

4.4.3. Resultados de Atenuación de las Fibras Fabricadas en el CIO

En esta etapa se realizaron las mediciones de las cuatro fibras, en un principio solamente se realizaron las mediciones de las fibras para longitudes de 10

metros y luego 2 metros, con lo cual se obtenía solamente un resultado, a veces este resultado podía no ser confiable, debido a que no se lo puede comparar con ningún otro dato, sin embargo con la experiencia adquirida en esta medición se detectó que la manera más fidedigna de realizar estas mediciones es hacerlo por pedazos de 30 metros, luego 10 metros y luego 2 metros (A más de 30 metros las pérdidas son muy altas y debido a esto se utilizó 30 metros como longitud máxima).

Cuando se tienen 3 o 4 mediciones de atenuación, se pueden comparar los valores de atenuación por distancia entre estos valores, cuando los valores (que en este caso son 4 gráficas diferentes) están muy cercanos unos a los otros se puede concluir de que se realizó una buena medición, caso contrario es necesario repetir la medición o analizar el motivo de tales errores.

En este tipo de mediciones, se conecta una de las puntas de la PCF a una fuente de radiación visible y ultravioleta, esta emite aproximadamente desde los 400 nm hasta los 1900 o 2000 nm. La fibra se mantiene enrollada en un tambor, el otro extremo se lo conecta al analizador de espectros, que en el presente caso mide desde 350 nm hasta los 1750 nm.

Se mide la primera distancia (la mas larga), luego se corta la fibra a una distancia menor conocida, y sin tocar ni cambiar la posición de la terminal que va a la fuente se vuelve a realizar la medición, de la misma forma se corta la fibra a una tercera distancia (generalmente 2 metros) y se realiza la última medición.

Una vez obtenidas las tres (mediciones) se procede a analizar las pérdidas, se utiliza la fórmula 4.1.

$$A = \frac{M2 - M1}{L2 - L1} [dB/km] \quad (4.1)$$

Donde M2 es la medición en decibels de la fibra más larga y M1 son los valores en decibels del retazo más corto. L2-L1 es la diferencia de longitud que hay entre ambas fibras medidas en kilómetros y A es la atenuación de la fibra en decibels por kilómetro.

En la figura 4.9, se tiene la gráfica de la atenuación de la fibra N6, como se puede observar en la misma, la atenuación está alrededor de los 110-120 dB/km en el rango de los 1500-1700 nm, que es el rango de longitudes de ondas donde presenta la menor atenuación, el pico de agua, alcanza su máximo nivel de atenuación de unos 700 dB/km a una longitud de onda aproximada de 1390 nm. La línea de 10-2 metros en la gráfica se encuentra

un poco más alejada de las otras dos líneas, lo que significa que esta medición no tiene una alta precisión.

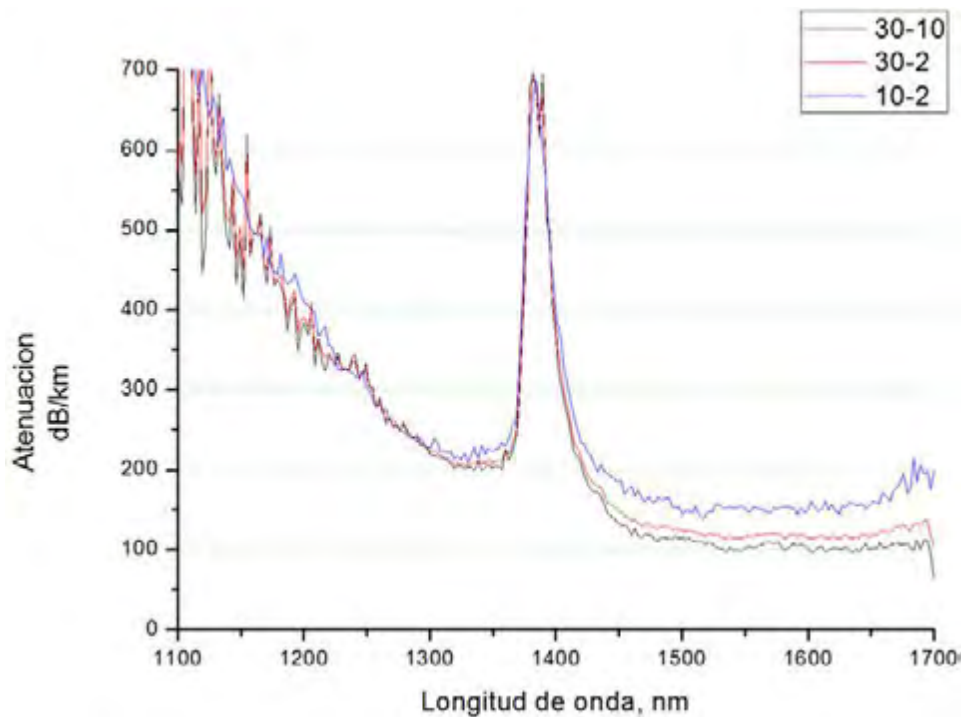


Figura 4.9: Gráfico de la atenuación de la fibra N6

En la figura 4.10 se tiene la gráfica de atenuación de la fibra N10, esta es la fibra con mayor atenuación de las cuatro, la mínima atenuación alcanza los 250-270 dB/km entre las longitudes de onda que van desde los 1500 nm hasta los 1650 nm aproximadamente. El pico de agua alcanza los 850 dB/km en su punto máximo a una longitud de onda aproximada de 1390 nm y a longitudes de onda inferiores a los 1400 la mínima atenuación es superior a los 300 dB/km, sin duda que debido a las altas atenuaciones, la medición no es muy precisa, y esto se puede observar en las diferencias de las gráficas.

En la figura 4.11 se tiene la gráfica de la atenuación de la fibra N7, esta fibra tiene mucho menos atenuación que las anteriores, y alcanza su mínimo valor de 40-60 dB/km a longitudes de onda que van desde los 1500 nm hasta los 1650 nm. El pico de agua alcanza su máximo nivel de 500 dB/km aproximadamente a los 1400 nm.

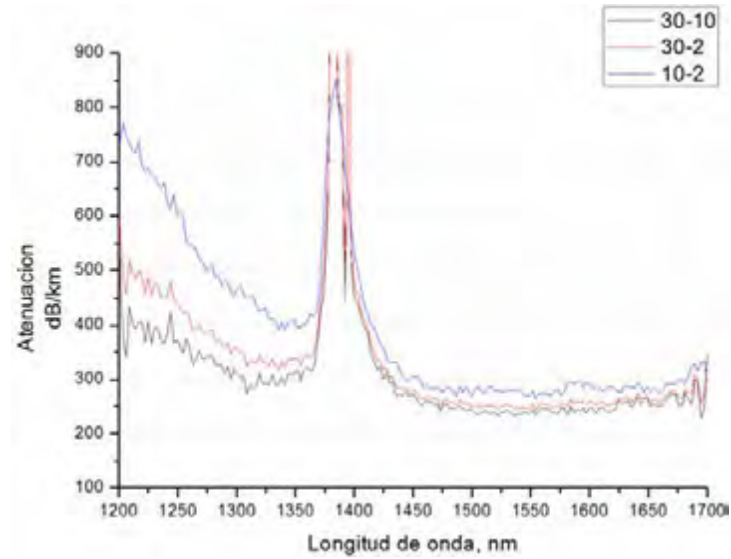


Figura 4.10: Gráfico de la atenuación de la fibra N10

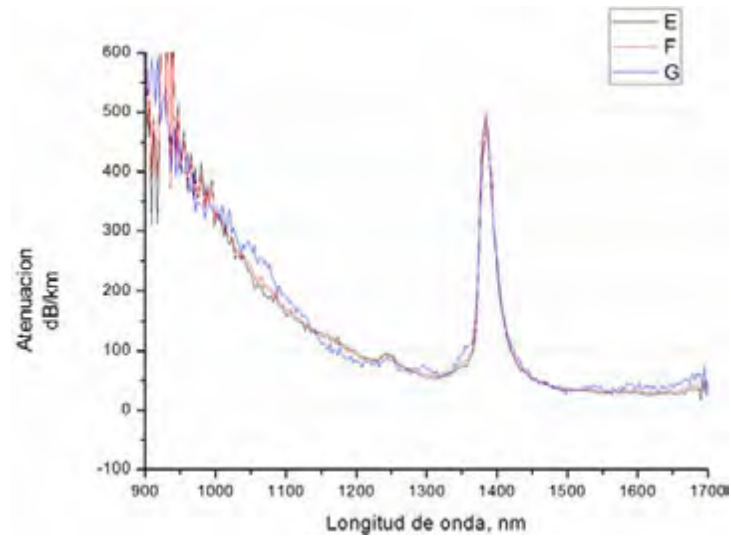


Figura 4.11: Gráfico de la atenuación de la fibra N7

La fibra N 9, cuya gráfica de atenuación se muestra en en la figura 4.12, sin duda es la mejor de todas ya que tiene la menor atenuación que alcanza los 15-30 dB/km entre los 1500 nm y los 1700 nm. El pico de agua al igual que el caso anterior alcanza los 500 dB/km en su máximo valor, pero esta

fibra aun tiene poca atenuación entre los 1200 y 1300 nm que va desde los 20 hasta los 50 dB/km. Sin duda alguna es una fibra con pocas pérdidas, pero además aquí se realizó una medición muy buena ya que las gráficas practicamente coinciden unas con otras.

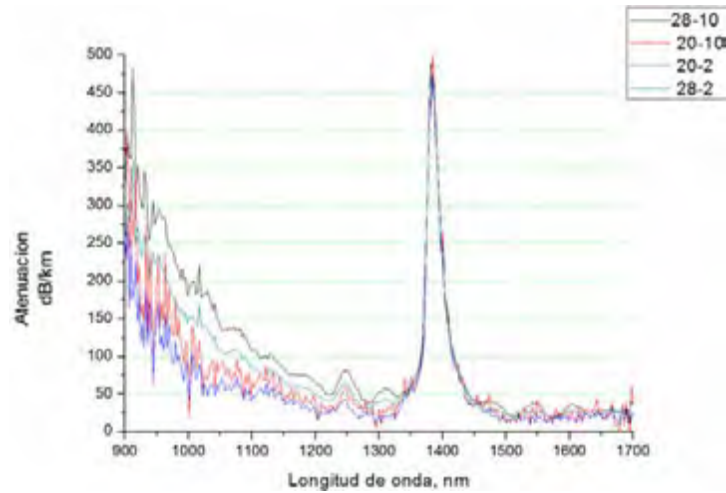


Figura 4.12: Gráfico de la atenuación de la fibra N9

En la figura 4.13 se muestran las atenuaciones de las cuatro fibras juntas, para tener más facilidad de comparación entre las fibras.

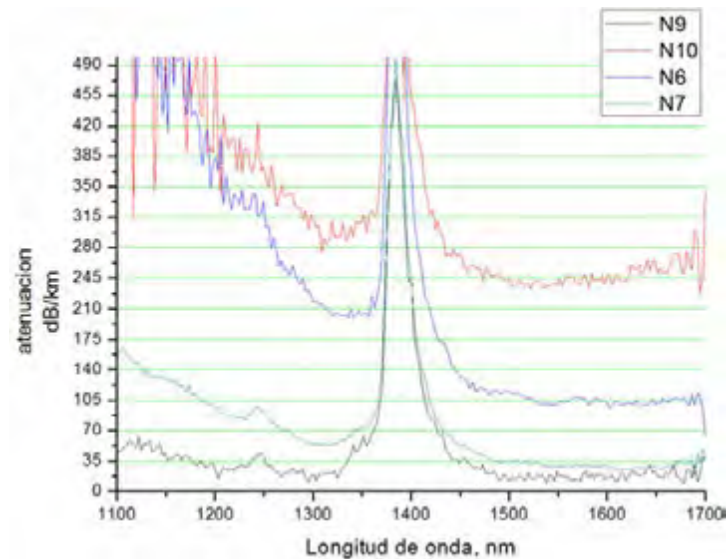


Figura 4.13: Gráfico de la atenuación de las cuatro fibras juntas

Bibliografía

- [1] W.J. Wadsworth, J.C. Knight, A. Ortigosa-Blanch, J. Arriaga, E. Silvestre, and P.S.J. Russell. Soliton effects in photonic crystal fibres at 850 nm. *Electronics Letters*, 36(1):53–55, 2000.
- [2] P.J. Bennett, T.M. Monro, and D.J. Richardson. Toward practical holey fiber technology: fabrication, splicing, modeling, and characterization. *Optics Letters*, 24(17):1203–1205, 1999.
- [3] H. Kubota, K. Suzuki, and S. Kawanishi. Low-loss, 2 km-long photonic crystal fiber with zero gvd in the near ir suitable for picosecond pulse propagation at the 800 nm band. In *Lasers and Electro-Optics, CLEO'01.*, pages CPD3–C1. IEEE, 2001.
- [4] K. Tajima, K. Nakajima, K. Kurokawa, N. Yoshizawa, and M. Ohashi. Low-loss photonic crystal fibers. In *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, OFC 2002*, pages 523–524. IEEE, 2002.
- [5] L. Farr, J.C. Knight, B.J. Mangan, and P.J. Roberts. Low loss photonic crystal fibre. In *Proceedings of 28th European conference on optical communication, PD1.3*, pages 1–2. IEEE, BlazePhotonics Ltd., 2002.
- [6] K. Tajima, J. Zhou, K. Nakajima, and K. Sato. Ultra low loss and long length photonic crystal fiber. In *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2003.
- [7] K. Tajima. Low water peak photonic crystal fibers. In *29th European Conf. on Optical Commun., ECOC'03*, 2003.
- [8] R.H. Doremus. Diffusion of water in silica glass. *Journal of Materials Research*, 10(9):2379–2389, 1995.
- [9] O. Humbach, H. Fabian, U. Grzesik, U. Haken, and W. Heitmann. Analysis of OH absorption bands in synthetic silica. *Journal of Non-crystalline Solids*, 203:19–26, 1996.
- [10] M. Bredol, D. Leers, L. Bosselaar, and M. Hutjens. Improved model for OH absorption in optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 8(10):1536–1540, 1990.
- [11] J. Stone and G.E. Walrafen. Overtone vibrations of OH groups in fused silica optical fibers. *The Journal of Chemical Physics*, 76:1712, 1982.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

En primer lugar hay que remarcar la importancia y relevancia del trabajo realizado junto con el Dr. Uladzimir Minkovich, de diseño de las PCF y del cálculo de las mismas, así como del método utilizado, pero sobre todo, lo que es más importante es la experiencia de fabricar una PCF en todas sus etapas, ya que este tipo de fibras se fabrican en muy pocos lugares del mundo.

En la etapa inicial de diseño y cálculo de las fibras existen muchos métodos para calcularlas, pero se ha optado por el método de los parámetros V y W por recomendación del Dr. V.P. Minkovich, y en esta parte de la tesis se ha adquirido la experiencia de calcular los parámetros de la PCF y realizar programas para facilitar dichos cálculos.

En la fabricación de la PCF se ha adquirido experiencia en cada una de las etapas del proceso y en el manejo de la máquina de estiramiento de las fibras, empezando por la fabricación de cada capilar, el apilamiento de ellos en el tubo para realizar la preforma y por último el estiramiento de la preforma y todos los inconvenientes que pueden presentarse al momento de la fabricación.

Es importante remarcar que es la primera vez que se realiza la fabricación de una PCF en México en base a cálculos predeterminados, lo cual es un logro bastante importante, ya que en el futuro se pueden utilizar estos resultados para realizar más investigaciones en el área del estiramiento de las PCF.

En lo que concierne a las mediciones de las dimensiones de la PCF, puede decirse que la forma más exacta y fidedigna de medir las mismas es con el Microscopio de fuerza atómica, ya que en el microscopio óptico se presentan efectos que hacen variar la imagen que se obtiene con respecto a las dimensiones reales.

En las mediciones del ángulo del cono de luz y de la apertura numérica, se puede llegar a la conclusión de que el método utilizado (método de los

parámetros V y W) se acerca mucho a la realidad.

Los valores teóricos (obtenidos mediante las fórmulas) y los valores prácticos medidos en el laboratorio, presentan en el peor de los casos un 11 % de error relativo, habiéndose obtenido en otro caso un error del 4 % e incluso para el mejor de los casos, un error menor al 1 %.

Las medidas de dispersión no se realizaron, ya que no se cuenta con los instrumentos para hacerlo, pero en base a la precisión de la apertura numérica se puede concluir que los valores de longitud de onda para las cuales se tiene cero dispersión es muy cercano al calculado, ya que en realidad los resultados calculados tanto de la apertura numérica como de la longitud de onda, para la que se tiene dispersión cero, ocupan los mismos índices de refracción n_{FSM} y n_{eff} para determinar sus valores.

Las pérdidas registradas para las 4 PCF fabricadas varían, y van desde los 10-20 dB/km en una, y hasta los 250-300 dB/km en otra.

Teóricamente mientras más velocidad de entrega de la preforma se aplique al fabricar la fibra, tendría que obtenerse diámetros de los capilares mayores, por lo tanto, menos pérdidas, y mientras mayor temperatura en el momento de la fabricación se le aplicara, tendría que tenerse capilares un poco menores, y por lo tanto, más pérdidas, por lo que teóricamente, tomando desde la menor hasta la mayor pérdida las 4 fibras tendrían que cumplir este orden:

1. Fibra N9 (Con una temperatura del horno de $1920^{\circ}C$, velocidad de estiramiento del 18 m/min.)
2. Fibra N7 (Con una temperatura del horno de $1930^{\circ}C$, velocidad de estiramiento del 17 m/min.)
3. Fibra N10 (Con una temperatura del horno de $1940^{\circ}C$, velocidad de estiramiento del 16 m/min.)
4. Fibra N6 (Con una temperatura del horno de $1950^{\circ}C$, velocidad de estiramiento del 15 m/min.)

Sin embargo, las atenuaciones obtenidas tienen un orden de pérdidas un poco diferente (también se indica de menor a mayor atenuación):

1. Fibra N9
2. Fibra N7
3. Fibra N6

4. Fibra N10

Es decir el orden de las dos últimas fibras está intercambiado. Lo lógico sería que la fibra N10, tenga menos pérdidas que la N6. Sin embargo pudieron existir agentes contaminantes durante la fabricación que se depositaron en el tramo de la fibra N6, haciendo que esta tuviera más atenuación, otra explicación puede ser la irregularidad del diámetro durante el proceso de fabricación, la cual pudo ser mayor durante el proceso de fabricación de la fibra N6 que durante la fabricación de la fibra N10.

Y por último hay que remarcar algo muy importante: Aprendí no solamente a diseñar y fabricar las PCF con un método bastante fidedigno, sino que también a utilizar los equipos de mediciones como son el analizador de espectro óptico y los medidores de potencia.

Trabajo futuro

Durante el doctorado se pretende trabajar con fibras de cristal fotónico de Bandgap (o zona prohibida), las cuales en contraste con la fibra de cristal fotónico con núcleo sólido (las cuales tienen similitud con las fibras convencionales debido a sus propiedades de guía de onda), las fibras de Bandgap fotónico tienen una diferencia fundamental con las fibras convencionales, la diferencia más interesante es el hecho de que el núcleo no necesita ser la región de mayor índice de refracción, como en el caso de las fibras con núcleo sólido, esta particularidad amplía las opciones, que antes eran inconcebibles.

Por ejemplo, algunas fibras ofrecen pequeños valores de no-linealidad, tienen cero dispersión para cierta longitud de onda y pérdidas menores que en el vidrio, lo que está limitado fundamentalmente por el esparcimiento de Raleigh.

Solo algunas compañías en el mundo fabrican este tipo de fibras (en Estados Unidos, en Gran Bretaña y en Dinamarca) y existen algunas fibras de Bandgap fotónico que tienen pérdidas muy altas (alrededor de los 10 dB/km en régimen monomodo). y son extremadamente caras (como 500 USD por metro de fibra), estas fibras aún no se usan en los sistemas de telecomunicaciones, pero encuentra aplicaciones en la industria de equipos láseres, equipos medicinales y sensores de fibra óptica.

Es importante también hacer énfasis en las fibras de cristal fotónico con alta no-linealidad (NL PCF) que tienen una gran aplicación en láseres de fibra

de luz blanca, aunque actualmente no se les utiliza para sensores debido a su gran costo. Los modelos de NL PCF que existen actualmente cuestan muy caros (alrededor de 1300 USD por metro de fibra).

APÉNDICE A

PROGRAMA PARA GRAFICAR PARÁMETROS PCF (MATHEMATICA)

```
ratio = 0,38;
pitch = 12,08875;
Clear[A, A2, A3, A4, B, B2, B3, B4, V, NFSM, aeff, W, neff, Veff, n, z, Weff]
A[r_] := Module[{q}, q = 0,54808 + 5,00401(r)^5 - 10,43248(r)^7 + 8,22992(r)^9];
A2[r_] := Module[{q}, q = 0,71041 + 9,73491(r)^1,8 + 47,41496(r)^7,32
-437,50962(r)^22,8];
A3[r_] := Module[{q}, q = 0,16904 + 1,85765(r)^1,7 + 18,96849(r)^10 - 42,4318(r)^14];
A4[r_] := Module[{q}, q = -1,52736 + 1,06745(r)^-0,84 + 1,93229(r)^1,02 +
3,89(r)^13,4];
V[λ_, r_] := Module[{q}, q = A[r] + (A2[r]/(1 + (A3[r] * Exp[A4[r] * λ/pitch])))];
B[r_] := Module[{q}, q = -0,0973 - 16,70566(r)^7 + 67,13845(r)^9 - 50,25518(r)^10];
B2[r_] := Module[{q}, q = 0,53193 + 6,70858(r)^1,49 + 52,04855(r)^6,58
-540,66947(r)^24,8];
B3[r_] := Module[{q}, q = 0,24876 + 2,72423(r)^3,85 + 13,28649(r)^10 - 36,80372(r)^15];
B4[r_] := Module[{q}, q = 5,29801 + 0,05142(r)^-2 - 5,18302(r)^0,41 + 2,7641(r)^6];
W[λ_, r_] := Module[{q}, q = B[r] + (B2[r]/(1 + (B3[r] * Exp[B4[r] * λ/pitch])))];
aeff = pitch/Sqrt[3];
S1 = 0,696166300;
S2 = 0,4079426;
S3 = 0,8974794;
T1 = 0,00467914826;
T2 = 0,0135120631;
T3 = 97,9340025;
n[λ_] := Module[{q}, q = Sqrt[1 + (S1 * λ^2)/((λ)^2 - T1) + (S2 * λ^2)/((λ)^2 - T2)
+(S3 * λ^2)/((λ)^2 - T3)]];
NFSM[λ_, r_] := Module[{q}, q = Sqrt[n[λ]^2 - ((λ * V[λ, r])/(2 * Pi * aeff))^2];
neff[λ_, r_] := Module[{q}, q = Sqrt[((W[λ, r] * λ)/(2 * Pi * aeff))^2 + NFSM[λ, r]^2];
Weff[λ_, r_] := Module[{q}, q = (2 * Pi/λ) * aeff * Sqrt[(neff[λ, r]^2 - NFSM[λ, r]^2)];
Veff[λ_, r_] := Module[{q}, q = (2 * Pi/λ) * aeff * Sqrt[(n[λ]^2 - NFSM[λ, r]^2)];
```

```
z =  $\lambda$ /pitch;  
r = 0,1  
Plot[{Veff[z, r], Veff[z, 2r], Veff[z, 3r], Veff[z, 4r], Veff[z, 5r], Veff[z, 6r], Veff[z, 7r],  
Veff[z, 8r]}, {z, 0, 30}, PlotRange  $\rightarrow$  {0, 7}, AspectRatio  $\rightarrow$  1/1,  
AxesLabel  $\rightarrow$  { $\lambda/\Lambda$ , Veff}]  
Plot[{NFSM[z, r], NFSM[z, 2r], NFSM[z, 3r], NFSM[z, 4r], NFSM[z, 5r], NFSM[z, 6r], NFSM[z, 7r],  
NFSM[z, 8r]}, {z, 0, 2, 1, 5}, PlotRange  $\rightarrow$  {1, 44, 1, 47}, AspectRatio  $\rightarrow$  1/1,  
AxesLabel  $\rightarrow$  { $\lambda/\Lambda$ , Nfsm}]  
Plot[{Weff[z, r], Weff[z, 2r], Weff[z, 3r], Weff[z, 4r], Weff[z, 5r], Weff[z, 6r], Weff[z, 7r],  
Weff[z, 8r]}, {z, 0, 20}, PlotRange  $\rightarrow$  {-1, 6}, AspectRatio  $\rightarrow$  1/1,  
AxesLabel  $\rightarrow$  { $\lambda/\Lambda$ , Weff}]  
Plot[{neff[z, r], neff[z, 2r], neff[z, 3r], neff[z, 4r], neff[z, 5r], neff[z, 6r], neff[z, 7r],  
neff[z, 8r]}, {z, 0, 3, 2, 5}, PlotRange  $\rightarrow$  {1, 43, 1, 46}, AspectRatio  $\rightarrow$  1/1,  
AxesLabel  $\rightarrow$  { $\lambda/\Lambda$ , neff}]
```

APÉNDICE B

CÁLCULO DE PARÁMETROS PCF (MATHEMATICA)

```
ratio = 0,38
pitch = 12,08875

A = 0,54808 + 5,00401(ratio)^5 - 10,43248(ratio)^7 + 8,22992(ratio)^9
A2 = 0,71041 + 9,73491(ratio)^1,8 + 47,41496(ratio)^7,32 - 437,50962(ratio)^22,8
A3 = 0,16904 + 1,85765(ratio)^1,7 + 18,96849(ratio)^10 - 42,4318(ratio)^14
A4 = -1,52736 + 1,06745(ratio)^-0,84 + 1,93229(ratio)^1,02 + 3,89(ratio)^13,4
lambda = 1,2433
V = A + (A2/(1 + (A3 * Exp[A4 * lambda/pitch])))
B = -0,0973 - 16,70566(ratio)^7 + 67,13845(ratio)^9 - 50,25518(ratio)^10
B2 = 0,53193 + 6,70858(ratio)^1,49 + 52,04855(ratio)^6,58 - 540,66947(ratio)^24,8
B3 = 0,24876 + 2,72423(ratio)^3,85 + 13,28649(ratio)^10 - 36,80372(ratio)^15
B4 = 5,29801 + 0,05142(ratio)^-2 - 5,18302(ratio)^0,41 + 2,7641(ratio)^6
W = B + (B2/(1 + (B3 * Exp[B4 * lambda/pitch])))
aeff = pitch/Sqrt[3]
S1 = 0,696166300;
S2 = 0,4079426;
S3 = 0,8974794;
T1 = 0,00467914826;
T2 = 0,0135120631;
T3 = 97,9340025;
n = Sqrt[1 + (S1 * lambda^2)/((lambda)^2 - T1) + (S2 * lambda^2)/((lambda)^2 - T2) +
(S3 * lambda^2)/((lambda)^2 - T3)]
NFSM = Sqrt[n^2 - ((lambda * V)/(2 * Pi * aeff))^2]
neff = Sqrt[((W * lambda)/(2 * Pi * aeff))^2 + NFSM^2]
Veff = (2 * Pi/lambda) * pitch * Sqrt[(neff^2 - NFSM^2)]
weff = aeff * (0,65 + (1,619/Veff^1,5) + (2,879/Veff^6))
phi = N[ArcTan[lambda/(Pi * weff)]/Degree]
wSMF = 4,6
alpha = -20 * Log[10, 2 * weff * wSMF/(weff^2 + wSMF^2)]
```

APÉNDICE C

CÁLCULO DE λ PARA DISPERSIÓN CERO (MATHEMATICA)

```
ratio = 0,38;
pitch = 12,08875;
Clear[A, A2, A3, A4, V, W, B, B2, B3, B4, aeff, n, NFSM, neff, Disp, n]
A = 0,54808 + 5,00401(ratio)^5 - 10,43248(ratio)^7 + 8,22992(ratio)^9;
A2 = 0,71041 + 9,73491(ratio)^1,8 + 47,41496(ratio)^7,32 - 437,50962(ratio)^22,8;
A3 = 0,16904 + 1,85765(ratio)^1,7 + 18,96849(ratio)^10 - 42,4318(ratio)^14;
A4 = -1,52736 + 1,06745(ratio)^-0,84 + 1,93229(ratio)^1,02 + 3,89(ratio)^13,4;
V[λ_]:=Module[{q}, q = A + (A2/(1 + (A3 * Exp[A4 * λ/pitch]))));
B = -0,0973 - 16,70566(ratio)^7 + 67,13845(ratio)^9 - 50,25518(ratio)^10;
B2 = 0,53193 + 6,70858(ratio)^1,49 + 52,04855(ratio)^6,58 - 540,66947(ratio)^24,8;
B3 = 0,24876 + 2,72423(ratio)^3,85 + 13,28649(ratio)^10 - 36,80372(ratio)^15;
B4 = 5,29801 + 0,05142(ratio)^-2 - 5,18302(ratio)^0,41 + 2,7641(ratio)^6;
W[λ_]:=Module[{q}, q = B + (B2/(1 + (B3 * Exp[B4 * λ/pitch]))));
aeff = pitch/Sqrt[3];
S1 = 0,696166300;
S2 = 0,4079426;
S3 = 0,8974794;
T1 = 0,00467914826;
T2 = 0,0135120631;
T3 = 97,9340025;
n[λ_]:=Module[{x}, x = Sqrt[1 + (S1 * λ^2)/((λ)^2 - T1) + (S2 * λ^2)/((λ)^2 - T2) +
(S3 * λ^2)/((λ)^2 - T3)];
NFSM[λ_]:=Module[{r}, r = Sqrt[n[λ]^2 - ((λ * V[λ])/(2 * Pi * aeff))^2];
neff[λ_]:=Module[{t}, t = Sqrt[((W[λ] * λ)/(2 * Pi * aeff))^2 + NFSM[λ]^2];
c0 = 3 * 10^-4;
Disp[λ_]:=Module[{s}, s = -((λ/c0) * (neff[λ]));
Plot[Disp[λ], {λ, 0, 2}, AxesLabel -> {Style[λ[nm], Large, Blue],
Style[Dispersion [ps/(km * mm)], Large, Blue]}, LabelStyle -> Large,
AspectRatio -> 1/1, PlotRange -> {{0, 2}, {-2000, 500}}]
FindRoot[Disp[λ], {λ, 1}]
```

APÉNDICE D

CÁLCULO DEL PITCH EN BASE A LAMBDA (MATHEMATICA)

```
ratio = 0,38;
Clear[A, A2, A3, A4, V, W, B, B2, B3, B4, aeff, n, NFSM, neff, Disp, n, λ, pitch]
A = 0,54808 + 5,00401(ratio)^5 - 10,43248(ratio)^7 + 8,22992(ratio)^9;
A2 = 0,71041 + 9,73491(ratio)^1,8 + 47,41496(ratio)^7,32 - 437,50962(ratio)^22,8;
A3 = 0,16904 + 1,85765(ratio)^1,7 + 18,96849(ratio)^10 - 42,4318(ratio)^14;
A4 = -1,52736 + 1,06745(ratio)^-0,84 + 1,93229(ratio)^1,02 + 3,89(ratio)^13,4;
V[λ_, pitch_] := Module[{q}, q = A + (A2/(1 + (A3 * Exp[A4 * λ/pitch])))];
B = -0,0973 - 16,70566(ratio)^7 + 67,13845(ratio)^9 - 50,25518(ratio)^10;
B2 = 0,53193 + 6,70858(ratio)^1,49 + 52,04855(ratio)^6,58 - 540,66947(ratio)^24,8;
B3 = 0,24876 + 2,72423(ratio)^3,85 + 13,28649(ratio)^10 - 36,80372(ratio)^15;
B4 = 5,29801 + 0,05142(ratio)^-2 - 5,18302(ratio)^0,41 + 2,7641(ratio)^6;
W[λ_, pitch_] := Module[{q}, q = B + (B2/(1 + (B3 * Exp[B4 * λ/pitch])))];
aeff[pitch_] := Module[{q}, q = pitch/Sqrt[3]];
S1 = 0,696166300;
S2 = 0,4079426;
S3 = 0,8974794;
T1 = 0,00467914826;
T2 = 0,0135120631;
T3 = 97,9340025;
n[λ_] := Module[{x}, x = Sqrt[1 + (S1 * λ^2)/((λ)^2 - T1) + (S2 * λ^2)/((λ)^2 - T2)
+ (S3 * λ^2)/((λ)^2 - T3)];
NFSM[λ_, pitch_] := Module[{r}, r = Sqrt[n[λ]^2 - ((λ * V[λ, pitch])
/(2 * Pi * aeff[pitch]))^2];
neff[λ_, pitch_] := Module[{t}, t = Sqrt[((W[λ, pitch] * λ)/
(2 * Pi * aeff[pitch]))^2 + NFSM[λ, pitch]^2];
c0 = 3 * 10^ - 4;
Disp[λ_, pitch_] := Module[{s}, s = -((λ/c0) * (D[neff[λ, pitch], {λ, 2}])))

FindRoot[0==Disp[λ, pitch]/. {λ → 1,06}, {pitch, 3}]
```

APÉNDICE E

PROGRAMA PARA DISEÑO DE PCF (MATLAB)

```
clear all
mnt=10;          %radio externo
mnt2=8           %radio interno
mnt3=1.54/2; %radio capilar externo
mnt7=0.38; %relacion de radios externo-interno de los capilares
mnt8=mnt7*mnt3;
mmk=mnt2/mnt3;
mmk2=round(mmk);
mmk3=mmk2-mmk;
if mmk3<0
    mmk4=mmk2;
else
    mmk4=mmk2-1;
end
mmk5=mmk4/2; mmk6=round(mmk4/2);
if mmk5==mmk6
    mmk4=mmk4-1;
end %circuitos que ahora si caben
circlex=rsmak('circle',mnt);
circlex2=rsmak('circle',mnt2);
fnplt(circlex); hold on; axis ([-mnt-1 mnt+1 -mnt-1 mnt+1]);
axis square
circlexmin=rsmak('circle',mnt3);
fnplt(circlex2);
circlexminmin=rsmak('circle',mnt8);
for l=1:mmk4
    circlex=fncmb(circlexmin,[mnt3*2*(l-1)-mnt3*2*(mmk4/2-0.5);0]);
    fnplt(circlex)
end
for l=1:mmk4
    if mnt3*2*(l-1)~mnt3*2*(mmk4/2-0.5)
        circlex=fncmb(circlexminmin,[mnt3*2*(l-1)-mnt3*2*(mmk4/2-0.5);0]);
        fnplt(circlex)
    end
end
mmk20=2*sqrt(mnt2^2-3*mnt3^2);
mmk21=mmk20/(mnt3*2);
```

```

mmk22=round(mmk21);
mmk23=mmk22-mm21;
if mmk23<0
    mmk24=mmk22;
else
    mmk24=mmk22-1;
end
mmk25=mmk24/2; mmk26=round(mmk24/2);
if mmk25~=mmk26
    mmk24=mmk24-1;
end
for l=1:mmk24
    circlep=fncmb(circlemin,[mnt3+mnt3*2*(l-1)-mnt3*2*(mmk24/2);
    sqrt(3)*mnt3]);
    fnplt(circlep)
end
for l=1:mmk24
    circlep=fncmb(circleminmin,[mnt3+mnt3*2*(l-1)-mnt3*2*(mmk24/2);
    sqrt(3)*mnt3]);
    fnplt(circlep)
end
for l=1:mmk24
    circlep=fncmb(circlemin,[mnt3+mnt3*2*(l-1)-mnt3*2*(mmk24/2);
    -sqrt(3)*mnt3]);
    fnplt(circlep)
end
for l=1:mmk24
    circlep=fncmb(circleminmin,[mnt3+mnt3*2*(l-1)-mnt3*2*(mmk24/2);
    -sqrt(3)*mnt3]);
    fnplt(circlep)
end
hold off

```

VITA

Marcelo Vaca Pereira Ghirghi nace en Santa Cruz de la Sierra, Bolivia en 1983. En el año de 1989, su familia se traslada a Brasil donde viven por tres años en la ciudad de Corumbá. Después de este periodo, vuelve a Santa Cruz de la Sierra donde termina el ciclo escolar básico y medio. En el año 2000 ingresa a la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno de Santa Cruz de la Sierra para estudiar la carrera de ingeniería electromecánica.

Pero el año 2003 obtiene una beca para estudiar en Rusia, realizando los cursos propedéuticos de idioma ruso en la ciudad de Belgorod por un año. Después, se traslada a Moscú, donde ingresa en el año 2004 a la Universidad Estatal de Geodesia y Cartografía de Moscú a la carrera de ingeniería de equipos y sistemas optoelectrónicos.

En el año 2009 termina la carrera y defiende su tesis en el 2010, cuyo tema fue “Equipo LIDAR para la medición de velocidad y dirección del viento en un aeropuerto”. Su asesor de tesis fue el Dr. Yuri Anatolievich Fotiev.

En el mismo año, postula e ingresa al Centro de Investigaciones en Óptica para realizar la Maestría en Ciencias (Óptica), que realiza desde septiembre del año 2010 hasta agosto del año 2012 con el Dr. Uladzimir Petrovich Minkovich; ésta tesis representa la culminación de este trabajo.

A partir de septiembre, 2012 al año 2015 pretende terminar el Doctorado en Ciencias (Óptica) en la misma institución, para seguir su trabajo con el Dr. Uladzimir Minkovich en temas relacionados a la fabricación de fibras de cristal fotónico.

