

CAPÍTULO 2. FIBRAS ÓPTICAS

2.1 Fibras ópticas convencionales

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica fabricada en materiales de bajas pérdidas como vidrio de silicio o plásticos, en forma cilíndrica (ver figura 11), la construcción de las fibras ópticas les aporta flexibilidad. En el centro tienen un núcleo en el cual la luz es guiada, integrada en otro recubrimiento con índice de refracción ligeramente más bajo. Los rayos de luz inciden en la frontera del núcleo recubierto en ángulos mayores que el ángulo crítico de reflexión interna total y son guiados a través del núcleo sin refracción.

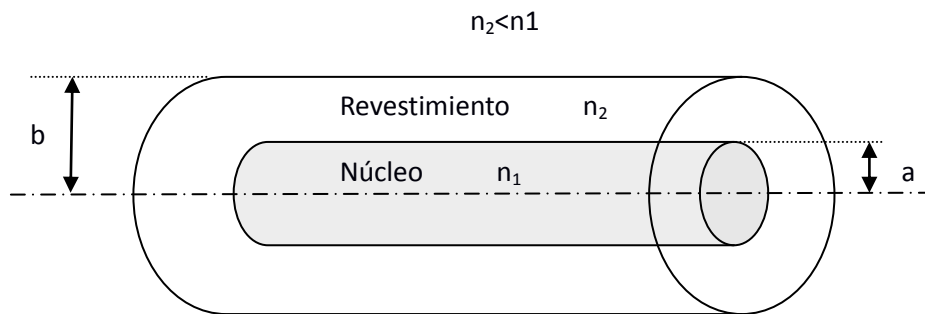


Figura 11. Una fibra óptica es una guía de onda cilíndrica.

Se define el ángulo crítico de reflexión de una onda lumínica que se propaga por un medio isotrópico al incidir sobre otro medio, con un índice de refracción menor, como el mínimo valor necesario del ángulo de incidencia, para que se produzca la reflexión de la onda lumínica incidente.

Para ondas lumínicas con ángulos de incidencia inferiores al ángulo crítico, se producirá una refracción de la onda lumínica incidente en el medio que tenga el menor índice de refracción (ver figura 12).

Llamamos zona de refracción al ángulo delimitado entre la normal y el ángulo crítico de reflexión, y la zona de reflexión está delimitada por la superficie de contacto y el ángulo crítico de reflexión.

Este ángulo es función de los índices de refracción de los medios en contactos y esta dado por:

$$\text{Sen } \lambda = N_B / N_A \quad (21)$$

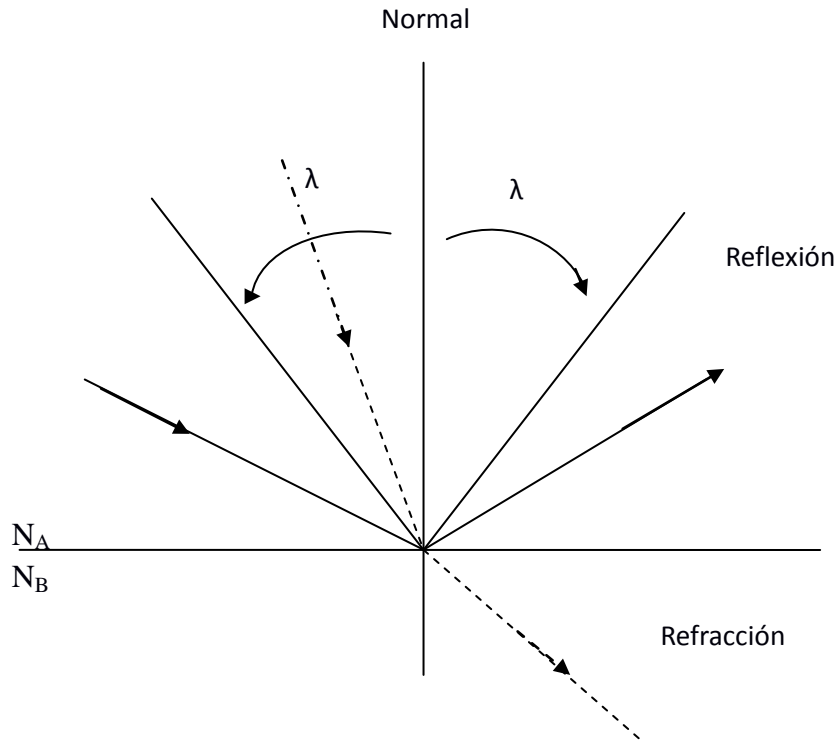


Figura 12. Ángulo crítico de reflexión λ , cualquier haz de luz incidente en un ángulo menor a este será refractado.

Podemos distinguir dos tipos de fibras ópticas dependiendo del diámetro de su núcleo, cuando el núcleo de la fibra óptica es pequeño, y solo permite la transmisión de un modo se dice que la fibra es monomodo (De 9 a $10\mu\text{m} \pm 10\%$ de diámetro). Las fibras con diámetros grandes permiten múltiples modos por lo que son nombradas multimodales ($50\mu\text{m} \pm 6\%$ de diámetro).

Los modos son campos que mantienen la misma distribución transversa y polarización a todas las distancias a lo largo del eje de la guía de onda. Cada modo viaja a lo largo del eje de la guía de onda con una distinta propagación constante y una velocidad de grupo.

Una dificultad de las fibras ópticas multimodales es la propagación de la luz, surge de las diferencias entre las velocidades de grupo de los modos. Esto resulta en una variedad de tiempos de viaje así que los pulsos de luz son tan amplios como los viajes a lo largo de la fibra. Este efecto es conocido como “dispersión modal”.

La dispersión modal puede ser reducida clasificando el índice de refracción del núcleo de la fibra de un valor máximo en su centro a un valor mínimo en la frontera del núcleo y revestimiento. La fibra es entonces llamada fibra de perfil gradual, considerando las fibras convencionales con índices de refracción constante en núcleo y revestimiento son llamadas fibras de perfil escalonado [1, 6, 11].

2.1.1 Caracterización de las fibras ópticas

La caracterización de las fibras ópticas está basada en la determinación de parámetros característicos de las fibras ópticas en función del tipo específico a caracterizar, los parámetros son de tres tipos:

- Parámetros Geométricos.
- Parámetros Estructurales ópticos.
- Parámetros Fundamentales de Transmisión.

A continuación se enumeran los parámetros en los cuales hay diferencias según el comportamiento de la fibra (Monomodo o Multimodo) [11].

Parámetros geométricos

- Diámetro del núcleo.
- No circularidad del Núcleo.
- Error de concentricidad del núcleo-revestimiento.
- Diámetro del revestimiento.
- No circularidad del revestimiento.
- Diámetro del recubrimiento primario.
- No circularidad del recubrimiento primario.
- Error de concentricidad revestimiento-recubrimiento primario.

Parámetros Estructurales Ópticos

- Apertura numérica.
- Perfil de la fibra óptica.
- Longitud de Onda Límite (solo fibras Monomodo).
- Diámetro del Campo Modal (solo fibras Monomodo).
- Error de Concentricidad del Campo Modal (solo fibras Monomodo).

Parámetros Fundamentales de Transmisión

- Coeficiente de atenuación.
- Dispersión total/Ancho de banda (solo fibras Multimodo).

2.1.2 Perfiles de las Fibras Ópticas

El perfil de la fibra óptica se define para la sección transversal mínima, como la distribución de los índices de refracción a lo largo de un diámetro de una fibra óptica.

Ya que el índice de refracción del revestimiento siempre es constante, se puede clasificar las fibras ópticas en función de su perfil de índice de refracción del núcleo en perfil gradual y perfil escalonado (ver figura 13).

Las fibras con perfil escalonado podemos encontrarlas en dos diferentes comportamientos, monomodo o multimodo. En cambio las fibras de perfil gradual solo existen para comportamiento multimodo [6].

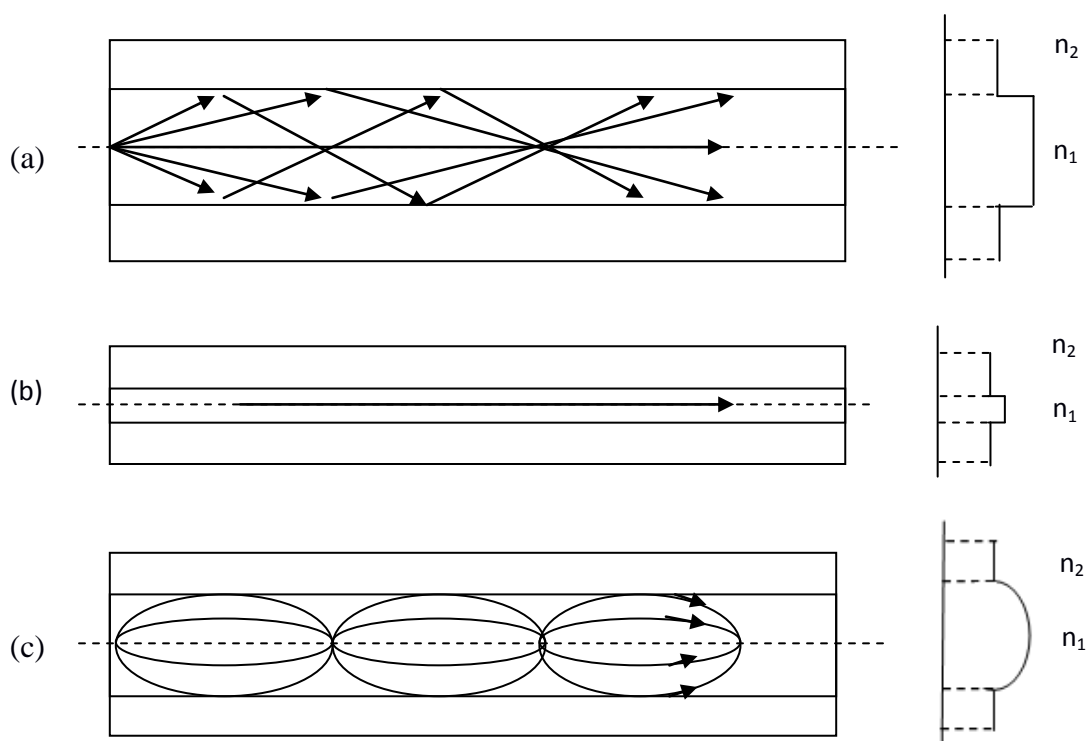


Figura 13. (a) Fibra óptica de perfil escalonado multimodo. (b) Fibra óptica de perfil escalonado monomodo. (c) Fibra óptica de perfil graduado.

Perfil gradual

En este tipo de fibras ópticas, el índice de refracción del núcleo no permanece constante, presentando una sección cóncava con una forma acampanada, de manera que el valor del índice de refracción en el centro del núcleo de la fibra es máximo y decrece a medida que nos aproximamos a su periferia. En la frontera del núcleo y revestimiento se igualan los valores de ambos índices de refracción, a partir de éste punto y a lo largo de toda su sección permanece constante el valor del índice de refracción del revestimiento [6, 11].

Perfil escalonado

En estas fibras ópticas, el valor del índice de refracción del núcleo permanece constante, presenta una sección recta, de manera que el valor del índice de refracción a lo largo de toda la sección del núcleo de la fibra óptica es el mismo.

En la frontera entre el núcleo y el revestimiento el valor del índice de refracción decrece bruscamente y la fibra óptica presenta una sección en escalón con dos secciones rectas. El valor del índice de refracción en el núcleo es siempre mayor al valor del revestimiento.

Este tipo de fibras tiene dos tipos fundamentales de comportamiento monomodo y multimodo. La diferencia entre ambos radica que en las fibras ópticas monomodo se propaga el modo fundamental o modo de orden inferior únicamente por el núcleo, mientras que en las fibras multimodo se propagan siempre varios modos: el fundamental y otros asociados o modos de orden superior [6, 11].

2.1.3 Parámetros geométricos de las fibras ópticas

Para definir el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica lo hacemos en función de la distancia a medida que nos desplazamos desde el centro del núcleo hacia su periferia.

Para el revestimiento puede ser definido en función de la distancia a medida que nos desplazamos desde la frontera entre el núcleo y revestimiento hacia la periferia del revestimiento. Pero a diferencia del núcleo el índice de refracción en el revestimiento es siempre constante.

Los parámetros geométricos y las leyes en base a las cuales se determina la distribución de los índices de refracción de núcleo y revestimiento son la diferencia de índices de refracción conocido como “ Δ ” y el exponente del perfil “g” [11].

Diferencia de índices de refracción Δ

Δ Es un parámetro geométrico de las fibras ópticas y se define como la relación existente entre los valores de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento conforme a la siguiente expresión [11]:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (22)$$

Exponente del perfil de la fibra (g)

Este parámetro geométrico de las fibras ópticas es crítico, ya que es el parámetro adoptado para determinar si la fibra es de perfil gradual o escalonado.

La ley que rige la distribución de los índices de refracción para el núcleo de la fibra óptica, en función de los parámetros geométricos está dada por la siguiente expresión [11]:

$$N_{(R)}^2 = N_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{R}{A} \right)^g \right] \quad (23)$$

Donde:

$N_{(R)}^2$ Es el índice de refracción al cuadrado, en función de la distancia centro del núcleo del núcleo-periferia del núcleo.

N_1^2 Es el valor máximo del índice de refracción del núcleo al cuadrado, correspondiente al valor en el centro del núcleo.

g Es el exponente del perfil

R Es la distancia medida en el sentido núcleo periferia del núcleo, expresada en micras.

A Es el radio del núcleo de la fibra óptica expresado en micras.

2.1.4 Parámetros estructurales de las fibras ópticas

Estos parámetros son los encargados de determinar el comportamiento de la fibra óptica, a partir de los parámetros geométricos adoptados.

Esto nos permite determinar el número total de modos o haces lumínicos que pueden propagarse simultáneamente por el núcleo de la fibra óptica, así como el rango de longitudes de onda de los mismos [11].

Apertura numérica

Cuando un rayo de luz incide en la fibra óptica, la onda lumínica sufre un cambio en su medio de propagación, el fenómeno que permite esto se conoce como refracción, a su vez el rayo incidente para poder ser propagado en la fibra tiene que incidir con un ángulo menor al ángulo crítico de reflexión.

Al parámetro que conjugado con estos fenómenos físicos, refracción y reflexión, delimita el paso de los pulsos lumínicos capaces de ser propagados por el núcleo de una fibra óptica es conocido como apertura numérica.

La apertura numérica se define como el valor numérico del seno del máximo ángulo que posibilita el acoplamiento de la onda lumínica desde el exterior de la fibra óptica hasta su interior.

$$A. N. = \sin \alpha_{I_{max}} \quad (24)$$

La relación existente entre la diferencia de índices de refracción y la apertura numérica está dada por la siguiente expresión [11]:

$$A. N. = \sqrt{2\Delta n_1^2} \quad (25)$$

Parámetro Estructural V

El parámetro estructural V, es un parámetro utilizado como paso intermedio para el cálculo del número de modos que es posible propagar por el núcleo de una fibra óptica.

En el caso de las fibras ópticas monomodo, en las que sólo se propaga el modo fundamental, es utilizado para determinar el valor de la longitud de onda límite y para la obtención del diámetro del campo modal.

Su cálculo está dado por:

$$V = 2\pi \frac{A}{\lambda} A \cdot N. \quad (26)$$

Donde a es el radio del núcleo de la fibra óptica, expresado en micras y λ es la longitud de onda del pulso lumínico propagado [11].

Número de modos propagados (M)

Este parámetro indica el número total de modos que pueden ser propagados por el núcleo de la fibra óptica.

Existen diferentes formas para realizar una aproximación de este cálculo, aquí presentamos una de las expresiones [6,11]:

$$M \approx \frac{V^2}{2} \left(\frac{g}{g+2} \right) \quad (27)$$

Donde:

g Es el exponente de perfil

V Es el parámetro antes calculado en la ecuación (26)

2.2 Fibras ópticas centelladoras

Las fibras centelladoras son llamadas así porque su núcleo está fabricado con materiales los cuales producen emisión de fotones en un rango visible cuando partículas de alta energía pasan a través del núcleo.

Las fibras centelladoras son fibras plásticas, consisten de un núcleo de poliestireno (PS) dopado y una cubierta de acrílico o polimetilmetacrilato (PMMA), dependiendo del material y la cantidad del dopante pueden emitir radiaciones pico en el rango de 428 nm a 538 nm. Este tipo de fibras es inmune a los campos electromagnéticos y presenta una buena

resistencia física a la radiación, por ambas razones son muy usadas en equipos de pruebas con un gran nivel de energía [12].

A continuación se muestra una tabla con algunos datos técnicos proporcionados por BICRON

Material centellador en el núcleo.....	Poliestireno
Índice de refracción del núcleo.....	1.6
Densidad.....	1.05g/cm ²
Recubrimiento.....	Acrílico
Índice de la cubierta.....	1.49
Espesor del recubrimiento, en fibras circulares.....	3% del diámetro del núcleo
Espesor del recubrimiento, en fibras cuadradas.....	4% del espesor de la fibra
Temperatura de operación.....	20 a 50 °C
Número de átomos de H por cm ³ (núcleo).....	4.82x10 ²²
Número de átomos de C por cm ³ (núcleo).....	4.85x10 ²²
Número de átomos-electrones por cm ³ (núcleo).....	3.4x10 ²³

Tabla 1. Propiedades ópticas y físicas de fibra óptica centelladora de BICRON [13].

2.3 Fibras de cristal fotónico

Las fibras de cristal fotónico (también conocidas como fibra de micro estructura o microestructurada). La estructura más simple y la más usada de este tipo de fibra es construida en un arreglo hexagonal periódico o circular, con un núcleo sólido de sílice recubierto con un revestimiento microestructurado de sílice-aire, como podemos ver en la figura 14.

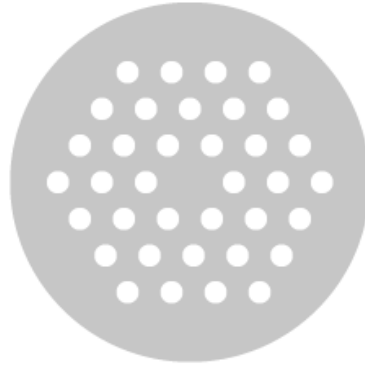


Figura 14. Configuración más usada en las fibras de cristal fotónico [14]

Este tipo de fibras pueden presentar un comportamiento monomodal universal, lo que significa que puede transmitir desde infrarrojo hasta ultravioleta, también pueden tener un área efectiva modal muy grande o muy pequeña, según si se desea transmitir alta potencia o acrecentar la respuesta no lineal respectivamente. Este tipo de fibras puede tener una apertura numérica muy grande, y mediante el diseño adecuado de su geometría es posible controlar la dispersión cromática.

También hay fibras llamadas de banda prohibida (band gap), las cuales tienen un mecanismo de guiado totalmente diferente, basada en una región fotónica de banda prohibida en el recubrimiento. Este mecanismo permite guiar una onda lumínica por un núcleo hueco (un bajo índice), y es imposible que la luz sea propagada por el recubrimiento. Este tipo de fibras puede fabricarse para ser altamente no lineales o de dispersión anómala [14].

2.3.1 Fibras de núcleo hueco

En estas fibras la luz es confinada por un núcleo de aire, de tal forma que el recubrimiento microestructurado impide la propagación de la luz a lo largo de él (conocido como efecto “band gap”), dado que sólo una pequeña fracción de luz es propagada por el cristal, las no linealidades son minimizadas y además se logra limitar las pérdidas en comparación con las fibras convencionales [15].

2.3.2 Fibras altamente no lineales

Este tipo de fibras es posible construirlas con núcleos muy reducidos (del orden de hasta $1\mu\text{m}$), y además también una alta relación de contraste entre los índices del núcleo y el recubrimiento, esto permite construir fibras con valores extremadamente pequeños de área efectiva y un alto coeficiente no lineal. Adicionalmente, los perfiles de dispersión pueden ser diseñados para obtener ciertos efectos no lineales. Es así como pueden construirse diferentes efectos no lineales para aplicaciones como: efecto Raman, mezclado de cuatro ondas electromagnéticas, amplificación paramétrica, generación de supercontinuo, tomografía de coherencia óptica, espectroscopia entre otras [15].

2.4 Fibras ópticas dopadas con tierras raras

Este tipo de fibras utilizan vidrio dopado con iones de tierras raras, normalmente solo en su núcleo. Las fibras dopadas en tierras raras, generalmente son usadas como el medio activo de un sistema láser, en donde la fuente de bombeo usada es un láser el cual excita los iones generando un pulso de luz a diferente longitud de onda de su fuente de bombeo. Estas fibras también son conocidas como fibras activas y son medios de comunicación con un aumento de ganancia gracias a su confinamiento óptico en la estructura de la guía de onda.

Aquí se presenta una tabla de las longitudes de onda de las emisiones importantes de las fibras dopadas en tierras raras más comunes [14].

Ion	Vidrios anfitriones comunes	Emisiones importantes de longitudes de onda
Neodimio (Nd^{3+})	Vidrio de silicato y fosfato	1.03–1.1 μm , 0.9–0.95 μm , 1.32–1.35 μm
Iterbio (Yb^{3+})	Vidrio de silicato	1.0–1.1 μm
Erbio (Er^{3+})	Vidrio de silicato y fosfato, vidrio de fluoruro	1.5–1.6 μm , 2.7 μm , 0.55 μm

Tulio (Tm ³⁺)	Vidrio de silicato y germanio, vidrio de fluoruro	1.7–2.1 μm, 1.45–1.53 μm, 0.48 μm, 0.8 μm
Praseodimio (Pr ³⁺)	Vidrio de silicato y fluoruro	1.3 μm, 0.635 μm, 0.6 μm, 0.52 μm, 0.49 μm

Tabla 2. Principales dopajes en tierras raras y sus principales emisiones.

Las fibras dopadas son caracterizadas de igual forma que las fibras comunes pero además es importante conocer otros datos como:

- Concentración del dopaje de tierras raras, a menudo este dato es presentado en partes por millón por peso.
- La sección transversal en la que funcionan los mecanismos de emisión y absorción

Este tipo de fibras ópticas, dopadas con tierras raras principalmente son utilizados en la fabricación en implementación, de láseres, conocidos como láseres en fibra óptica como el laser de onda continua en fibra óptica de sílice, láseres visibles de fibra de fluoruro, láseres en fibra de ancho de espectral estrecho, láseres en fibra conmutados, láseres en fibra en modo amarre, además de los láseres existen amplificadores ópticos en fibra, como los amplificadores de bajo ruido en fibra dopada con Erblio a 1540 nm, amplificadores laser en fibra óptica dopada con Erblio, amplificadores de alta ganancia de amplio ancho de banda espectral en fibra dopada con Erblio, entre otros, pero también son utilizadas en la implementación de fuentes superluminiscentes, las cuales se diferencian de los láseres por una menor potencia pero con un ancho espectral mayor; una de las aplicaciones más difundida es en la utilización de sensores de velocidad angular [9, 16, 17, 18, 19].

Conclusiones al capítulo 2

La fibra óptica es una guía de onda cilíndrica y flexible, la cual es usada en telecomunicaciones para transmitir información por modulación de la luz, en donde la luz puede viajar grandes distancias con bajas pérdidas; hoy en día existen diferentes tipos de fibras ópticas basadas no solo en la estructura de la fibra, sino también en la estructura de los materiales.

Al hacer modificaciones en la estructura interna de los materiales y dopajes con otros elementos, se hizo posible que las fibras ópticas adquirieran nuevas características para diferentes aplicaciones, en el caso de la fibra óptica dopada con tierras raras las cuales conservan la gran mayoría de las características que las fibras convencionales, tienen aplicaciones como: amplificadores ópticos, medios activos para láseres y fuentes superluminiscentes.

La fibra óptica dopada con Erblio, en este trabajo fue usada como medio activo para implementar una fuente superluminiscente en fibra óptica, con una emisión pico a 1550 nm cuando es excitada por una fuente láser a 980 nm, la emisión del Erblio ofrece varias ventajas las cuales serán explicadas en el siguiente capítulo.