

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

**INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES CON MENCIÓN EN
GESTIÓN EMPRESARIAL**

TRABAJO DE TITULACIÓN

**ANÁLISIS PARA LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA OPTIFIBER DE
OPTIWAVE PARA LAS MEDICIONES DE LOS PARÁMETROS DE
DISEÑO DE LOS CABLES DE FIBRA ÓPTICA**

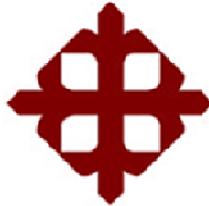
AUTOR:

MARÍA FERNANDA CARVAJAL VERA

TUTOR:

ING. NESTOR ZAMORA MSc.

2014



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo

Carrera: Ingeniería en Telecomunicaciones con Mención en Gestión Empresarial

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, MARÍA FERNANDA CARVAJAL VERA

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “ANÁLISIS PARA LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA OPTIFIBER DE OPTIWAVE PARA LAS MEDICIONES DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS CABLES DE FIBRA ÓPTICA”, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

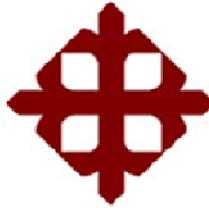
En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, Agosto del 2014

EL AUTOR:

.....

MARÍA FERNANDA CARVAJAL VERA



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo

Carrera: Ingeniería en Telecomunicaciones con Mención en Gestión Empresarial

AUTORIZACIÓN

Yo, María Fernanda Carvajal Vera

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución, del trabajo de titulación: “ANÁLISIS PARA LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA OPTIFIBER DE OPTIWAVE PARA LAS MEDICIONES DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS CABLES DE FIBRA ÓPTICA”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, Agosto del 2014

EL AUTOR:

.....

MARÍA FERNANDA CARVAJAL VERA

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN	15
1.1 Justificación.....	16
1.2 Planteamiento del problema.....	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Tipo de investigación	18
1.5 Hipótesis.....	18
1.6 Metodología	18
CAPÍTULO II	20
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA FIBRA ÓPTICA.....	20
2.1 Fuentes ópticas	20
2.2 Principios de la Fibra Óptica.....	21
2.3 Ventajas de la fibra óptica.....	22

2.3.1 Inmunidad al Ruido.....	22
2.3.2 Aislamiento Eléctrico.....	23
2.3.3 Tasas de Error Bajas.....	23
2.3.4 Uso Seguro en Áreas Peligrosas	23
2.3.5 Gran ancho de Banda	24
2.3.6 Baja Atenuación de la Señal	24
2.3.7 Peso ligero y diámetro pequeño	24
2.3.8 No Diafonía.....	24
2.3.9 Seguridad de las Señales Inherente.....	25
2.4 Estructura de una fibra óptica	25
2.5 Tipos de fibra óptica.....	26
2.5.1 Fibras monomodo	26
2.5.2 Fibras multimodo	27
2.5.2.1 Fibra multimodo de índice escalonado	27
2.5.2.2 Fibra multimodo de índice gradual	28
2.6 Parámetros característicos de una fibra óptica.....	29
2.6.1 Parámetros estáticos.....	30

2.6.1.1 La apertura numérica.....	30
2.6.1.2 Perfil del índice de refracción	31
2.6.1.3 Diámetro del núcleo	33
2.6.1.4 Diámetro del revestimiento	35
2.6.1.5 Error de concentricidad.....	35
2.6.1.6 No circularidad del núcleo	36
2.6.1.7 No circularidad del revestimiento	37
2.6.2 Parámetros dinámicos	38
2.6.2.1 Pérdidas y atenuación en la fibra	38
2.6.2.2 Dispersión temporal	41
2.7 Longitud de onda de corte.....	44
2.8 Birrefringencia	46
2.9 Dispersión por Modo de Polarización (PMD)	49
CAPÍTULO III.....	51
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL OPTIFIBER.....	51
3.1 Principales aplicaciones	51
3.2 Características generales del software OptiFiber.....	52

3.3 Pasos para el diseño de una fibra óptica en el software OptiFiber.....	53
CAPÍTULO IV	57
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA MONOMODO EN EL SOFTWARE OPTIFIBER	57
4.1 Perfil de la fibra.....	58
4.2 Variación del índice gradual y del índice de grupo.....	59
4.3 Dispersión cromática o intramodal	59
4.4 Pérdidas del material	60
4.5 Pérdidas por curvaturas	61
4.6 Pérdidas por empalme	62
4.7 Confinamiento de la fibra	63
4.8 Campo Modal.....	64
4.9 Birrefringencia	64
4.10 Dispersión por Modo de Polarización (PMD)	65
4.11 Cálculo de la longitud de onda de corte	66
CAPÍTULO V	68

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA MULTIMODO EN EL SOFTWARE OPTIFIBER	68
5.1 Perfil de la fibra.....	69
5.2 Variación del índice gradual y del índice de grupo.....	70
5.3 Dispersión cromática.....	71
5.4 Pérdidas del material	71
5.5 Pérdidas por curvaturas	72
5.6 Pérdidas por empalme	72
5.7 Confinamiento de la fibra	73
5.8 Campo Modal.....	73
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	79
ANEXOS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1: <i>Estructura de una fibra óptica</i>	25
Fig. 2.2: <i>Fibra óptica monomodo de índice escalonado</i>	26
Fig. 2.3: <i>Fibra óptica multimodo de índice escalonado</i>	28
Fig. 2.4: <i>Fibra óptica multimodo de índice gradual</i>	29
Fig. 2.5: <i>Cono de admisión de una fibra óptica</i>	31
Fig. 2.6: <i>Perfiles de índice de refracción de la fibra</i>	33
Fig. 2.7: <i>Motivos de la pérdida</i>	38
Fig. 2.8: <i>Diagrama de atenuación en una fibra</i>	40
Fig. 2.9: <i>Dispersión modal</i>	42
Fig. 2.10: <i>Dispersión del material</i>	43
Fig. 2.11: <i>Dispersión por efecto de guía de ondas</i>	44
Fig. 2.12: <i>Polariscopio lineal nulo</i>	47
Fig. 3.1: <i>Área de trabajo del software OptiFiber</i>	53
Fig. 3.2: <i>Muestra cómo empezar el diseño</i>	54
Fig. 3.3: <i>Ventana que muestra la selección del tipo de perfil</i>	54

Fig. 3.4: <i>Ventana donde se deben ingresar los datos referentes al núcleo y revestimiento.</i>	55
Fig. 3.5: <i>Como ingresar a propiedades del material.</i>	56
Fig. 3.6: <i>Ventana donde se establecen las propiedades del material.</i>	56
Fig. 4.1: <i>Creación de la región del núcleo y del revestimiento para la fibra monomodo G.652</i>	58
Fig. 4.2: <i>Perfil de la fibra monomodo G. 652.</i>	58
Fig. 4.3: <i>Variación del índice gradual y del índice de grupo con la longitud de onda.</i>	59
Fig.4.4: <i>Dispersión cromática en la fibra monomodo G.652.</i>	60
Fig. 4.5: <i>Perdidas del material para la fibra monomodo G.652.</i>	61
Fig. 4.6: <i>Pérdidas por curvaturas en la fibra monomodo G.652.</i>	62
Fig. 4.7: <i>Perdidas por empalmes en la fibra monomodo G. 652</i>	63
Fig. 4.8: <i>Confinamiento de la fibra monomodo G.652.</i>	63
Fig. 4.9: <i>Modo fundamental LP (0.1) para la fibra monomodo G.652.</i>	64
Fig. 4.10: <i>Birrefringencia en la fibra monomodo G. 652.</i>	65
Fig. 4.11: <i>Dispersión por Modo de Polarización en la fibra monomodo G.652.</i> .	65

Fig. 4.12: Valor medio y error medio de PMD.....	66
Fig. 4.13: Cálculo de la longitud de onda de corte.....	67
Fig. 5.1: Creación de la región del núcleo y del revestimiento para la fibra monomodo G.651	69
Fig. 5.2: Perfil de la fibra multimodo G. 651.	70
Fig. 5.3: Variación del índice modal y del índice de grupo con la longitud de onda, para la fibra multimodo G.651	70
Fig. 5.4: Dispersión cromática para la fibra multimodo G.651.	71
Fig. 5.5: Pérdidas por curvaturas en la fibra multimodo G.651.	72
Fig. 5.6: Perdidas por empalmes en la fibra multimodo G. 651.....	72
Fig. 5.7: Confinamiento de la fibra multimodo G.651.....	73
Fig. 5.8: Modo de propagación LP (1,5) para la fibra multimodo G.651.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: <i>Parámetros característicos de la fibra óptica.</i>	30
--	----

RESUMEN

En este proyecto se expone la fundamentación teórica de la fibra óptica; centrándonos más en sus parámetros principales, desde el punto de vista óptico, geométrico y de transmisión. Asimismo; se comenta acerca del software OptiFiber, sus principales aplicaciones y se realiza prácticas en dicho programa.

Utilizando las herramientas del software OptiFiber se efectúan simulaciones de dos tipos de fibras ópticas, tomadas de las recomendaciones de la UIT de la serie G. Luego se procede a calcular, la longitud de onda de corte, la Dispersión por Modo de Polarización, la birrefringencia, la dispersión del material, etc.

ABSTRACT

In this project the theoretical basis of the optical fiber is exposed; focusing more on their key parameters, from the point of optical, geometric and light transmission. Also; discussed about OptiFiber software, its main applications and practices in the program is done.

Using software tools OptiFiber simulations of two types of optical fibers, taken from the recommendations of the ITU series of G. Then we proceed to calculate, are made the cutoff wavelength, the Polarization Mode Dispersion, birefringence the dispersion of the material, etc.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

A medida que ha pasado el tiempo, el hombre ha creado objetos y dispositivos para remediar sus inconvenientes o cubrir sus necesidades; es así, que para solucionar el problema de intercambio de información ha inventado diversas formas de hacerlo, desde la comunicación con señas hasta la comunicación a distancia por medio de dispositivos de tecnología avanzada.

Gracias a los avances obtenidos en el área de telecomunicaciones el ser humano se ha desempeñado de una forma más eficiente; es así, que para aumentar la densidad de las telecomunicaciones más rápidamente y con un mejor servicio, se creó la FIBRA ÓPTICA. Este novedoso invento en poco tiempo se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas y más utilizadas, como medio de transmisión de información, debido a que llegó a innovar los procesos de telecomunicaciones en todos los sentidos; tanto así que alcanzó una mayor velocidad en la transmisión y recepción de datos, aminoró casi en su totalidad los ruidos y las interferencias.

Con el avance tecnológico, también se adquirieron herramientas que facilitan el diseño y simulación de fibras ópticas, pero lamentablemente no hay suficiente información acerca de estas herramientas; un ejemplo de esto es el OptiFiber, un software que ayuda a diseñar cualquier tipo de fibra, del cual hablaremos más adelante.

1.1 Justificación

El uso de Fibra óptica se ha convertido en algo común en los últimos años; según el ingeniero Jaime Guerrero, Ministro de telecomunicaciones y de la sociedad de la información, “A principios del 2007 Ecuador tenía instalados 3.500 Kilómetros de fibra óptica; hoy en día, en el territorio nacional se superan los 35.000 Kilómetros de fibra óptica”. (El Telégrafo, 2013). Además; el cableado de fibra óptica es el núcleo de las redes de comunicaciones de datos en la actualidad, no solo aquí en Ecuador, sino en el mundo entero.

Debido a lo expuesto anteriormente, es importante tener conocimiento acerca de herramientas de simulación de fibras ópticas, que contribuyan a un mejor aprendizaje de las mismas. El OptiFiber es un programa que utiliza solucionadores de modo numérico y otros modelos especializados a las fibras para el cálculo de la dispersión, las pérdidas, la birrefringencia y PMD.

1.2 Planteamiento del problema

La poca información que existe acerca del software OptiFiber, crea la necesidad de conocer las características y métodos a seguir para el diseño y simulación de fibras ópticas en dicho programa; el cual, puede ayudar a un mejor aprendizaje del estudiante en lo que se refiere a fibra óptica. LA MATERIA DE

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Demostrar que el OptiFiber es una herramienta útil que facilita el diseño y simulación de fibras ópticas para un mejor aprendizaje acerca de las mismas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir la fundamentación teórica de la fibra óptica.
- Describir la fundamentación teórica del OptiFiber.
- Diseñar y simular una fibra óptica en el software OptiFiber.

1.4 Tipo de investigación

Este proyecto se enmarcó dentro de los tipos de investigación, descriptiva y bibliográfica.

➤ Descriptiva

La investigación es de tipo descriptiva, debido a que este proyecto se basa en la descripción de las características de la fibra óptica y del software OptiFiber.

➤ Bibliográfica

Es de tipo bibliográfica, ya que la base teórica de esta investigación fue sustentada por fuentes bibliográficas.

1.5 Hipótesis

El conocimiento del software OptiFiber permitiría realizar diseños de fibras ópticas y la simulación de los parámetros de las mismas, con la finalidad de facilitar el aprendizaje de las fibras ópticas.

1.6 Metodología

El enfoque de este proyecto será cualitativo, ya que se describirá detalladamente las características de la fibra óptica y del software OptiFiber, para de esta manera poder alcanzar el objetivo planteado.

El método a utilizar será deductivo-inductivo, es decir que va de lo general a lo particular. Se describirá la fundamentación teórica de la fibra óptica y del software OptiFiber, para luego explicar el diseño y simulación de una fibra óptica.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es una guía de ondas ópticas, totalmente dieléctrica y de geometría cilíndrica; es un medio de transmisión físico capaz de ofrecer velocidades y distancias superiores a las de cualquier otro medio de transmisión. Se basa en un centro de cristal puro, rodeado de varias capas de material protector; lo que se transmite por este medio no son señales eléctricas, sino pulsos de luz que representan los datos a transmitir, ésta luz es producida por láser o por diodos; dicha luz viaja a través del núcleo y es convertida en señal eléctrica en el extremo receptor (sitio web INAOE, 2014). La Fibra óptica también goza de otras aplicaciones, por ejemplo: en la medicina, en la industria, en la mecánica, en decoraciones, como sensores, etc.

2.1 Fuentes ópticas

Son aquellos dispositivos que generan los impulsos luminosos que se propagarán a lo largo de la fibra. Existen dos categorías principales:

- Los Diodos Emisores de Luz (Light Emitting Diodes): son los dispositivos con menor desempeño; por esta razón, son utilizados en

aplicaciones donde las tasas de transmisión son bajas y/o las distancias son cortas. (Gycom, 2013)

- Los Diodos Laser Infrarrojos (Infrared Laser Diodes): Estos dispositivos trabajan a velocidades mucho más altas que los ‘LED’¹; por lo tanto, son más costosos. Disipan mayor cantidad de nivel de energía y necesitan compensadores de temperatura para mantener los niveles de desempeño especificado. (Gycom, 2013)

2.2 Principios de la Fibra Óptica

Las fibras ópticas propagan las señales de luz por el principio de ‘reflexión interna total’². Siempre que un rayo de luz atraviesa de un medio a otro, dicha luz se ve afectada por la frontera de ambos medios, esto se debe a que su velocidad varía al cruzar de un medio a otro. Cada medio es definido en términos de su índice de refracción, que es el resultado de la comparación entre la velocidad de la luz en dicho medio con la velocidad de la luz en el vacío. Esta relación entre los dos índices de refracción determina el ángulo crítico de incidencia entre los dos medios. (Gycom, 2013)

¹ Diodos emisores de luz (Light Emitting Diodes)

² Fenómeno que se produce cuando un rayo de luz atraviesa de un medio ópticamente más denso, a otro medio ópticamente menos denso.

Existen tres acciones que pueden suceder cuando un rayo de luz cambia de medio, y cada acción depende del ángulo de incidencia del rayo de luz cuando incide en el medio.

- Si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico, el rayo de luz se refractará, rebotando dentro del material que tiene un mayor índice de refracción.
- Si el ángulo de incidencia es exactamente igual al ángulo crítico, el rayo de luz viajará a lo largo de la unión de la superficie de los dos medios.
- Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, el rayo será reflejado.

2.3 Ventajas de la fibra óptica

2.3.1 Inmunidad al Ruido

Las fibras ópticas no son afectadas por la interferencia electromagnética; esto quiere decir, que no hace falta aislar los cables de fibra óptica de los cables eléctricos. Esto permite instalar más fácilmente los cables. (Gycom, 2013)

2.3.2 Aislamiento Eléctrico

Utilizando fibra óptica, los problemas causados por la inducción y los diferenciales de potencial, son eliminados. Las señales de campo generados por los dispositivos que emiten altos potenciales pueden ser acoplados a otros equipos con mucho menos potencial y sin el riesgo de daño. (Gycom, 2013)

2.3.3 Tasas de Error Bajas

Los sistemas de fibra óptica transmiten una tasa de error de bits muy baja cuando están diseñados apropiadamente para distribuir niveles correctos de señal en el extremo receptor del enlace.

2.3.4 Uso Seguro en Áreas Peligrosas

La tecnología de fibra óptica es mucho más útil cuando se diseñan sistemas interiormente seguros. Los enlaces de fibra óptica pueden ser empleados en áreas con atmósfera potencialmente explosiva, sin el riesgo de provocar o almacenar energía suficiente para iniciar una explosión. (Gycom, 2013)

2.3.5 Gran ancho de Banda

Los cables de fibra óptica pueden transportar más información en mayores distancias y en menos tiempo que cualquier otro medio de comunicación; esto quiere decir que se deben utilizar menos cables, menos repetidoras, menos energía y que se realicen menos mantenimientos. (Gycom, 2013)

2.3.6 Baja Atenuación de la Señal

A diferencia de los cables de cobre; la atenuación que presentan las fibras ópticas es debida a la absorción y a la dispersión, y es relativamente independiente de la frecuencia. (Gycom, 2013)

2.3.7 Peso ligero y diámetro pequeño

Los cables de fibra óptica son más pequeños y ligeros; gracias a que se pueden multiplexar muchas señales en una fibra. Esto hace más fácil su instalación. (Gycom, 2013)

2.3.8 No Diafonía

Las señales en los cables cercanos no se conectan entre ellas; ya que, las fibras no absorben interferencia electromagnética. (Gycom, 2013)

2.3.9 Seguridad de las Señales Inherente

El mejor medio para aplicaciones en donde la señal es un factor importante, son las fibras ópticas, debido a que no forman campos electromagnéticos que puedan ser captados por sensores externos. Además, es más difícil robar señales. (Gycom, 2013)

2.4 Estructura de una fibra óptica

Una fibra óptica consta de las siguientes partes: el núcleo central que está compuesto de vidrio de alta pureza, el recubrimiento que está compuesto por un vidrio menos puro que el del núcleo y una capa protectora llamada revestimiento. (UM, 2014). En la figura 2.1 se muestra la estructura de una fibra óptica

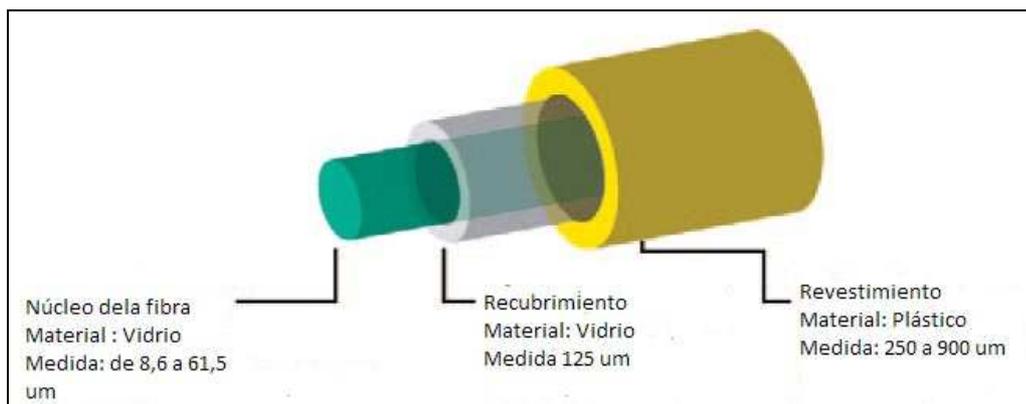


Fig. 2.1: Estructura de una fibra óptica.

Fuente: (Oñate, 2011)

2.5 Tipos de fibra óptica

Son dos los tipos de fibra óptica que existen: la fibra monomodo y la fibra multimodo.

2.5.1 Fibras monomodo

Esta fibra es de índice escalonado; puede ser utilizada para transmisión analógica y digital. El diámetro del núcleo de estas fibras es de 8 a 10 μm , siendo constante su índice de refracción. Teóricamente, en este tipo de fibra, sólo se propaga un rayo de luz con una longitud de onda fija (DUTARI DUTARI, 2012), como se observa en la figura 2.2.

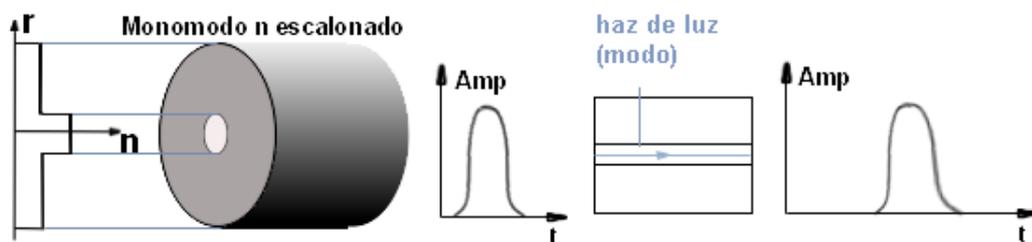


Fig. 2.2: Fibra óptica monomodo de índice escalonado.

Fuente: (Intelyde, 2014)

A diferencia de las fibras multimodo, estas fibras brindan mayor ancho de banda ($AB > 10\text{GHz/Km}$), permiten alcanzar mayores distancias (hasta $\sim 3\text{Km}$) y

transmitir datos a elevadas tasas (hasta 10Tb/s usando DWDM). Pero asimismo; son más delicadas y su instalación es más compleja, debido a sus pequeñas dimensiones. (DUTARI DUTARI, 2012)

2.5.2 Fibras multimodo

Este tipo de fibra se usa para aplicaciones de corta distancia. Como su mismo nombre lo indica; es aquella que puede propagar más de un modo de luz. Debido a que el diámetro de su núcleo es mucho más grande que las fibras monomodo (de 50 a 100 μm), su instalación es más fácil y económica. (DUTARI DUTARI, 2012). Las fibras ópticas multimodo se clasifican en: multimodo de índice escalonado y multimodo de índice gradual.

2.5.2.1 Fibra multimodo de índice escalonado

Este tipo de fibra es la que menor ancho de banda posee ($\Delta n = 0.02$ a 0.03), pero su calidad final es relativamente alta. Esta fibra permite el establecimiento de diferentes modos de propagación, tiene como característica fundamental que su índice de refracción en el núcleo es constante, en sentido radial. El índice del núcleo es siempre mayor que el del revestimiento, dado que entre los dos índices se crea un salto que se denomina de índice en escalón; de ahí su nombre. (DUTARI DUTARI, 2012)

En la figura 2.3 podemos observar como los rayos que inician el recorrido simultáneamente; al sufrir diversas incidencias, recorren trayectorias diferentes y llegan al final separados entre sí, provocando la deformación del pulso inicial.

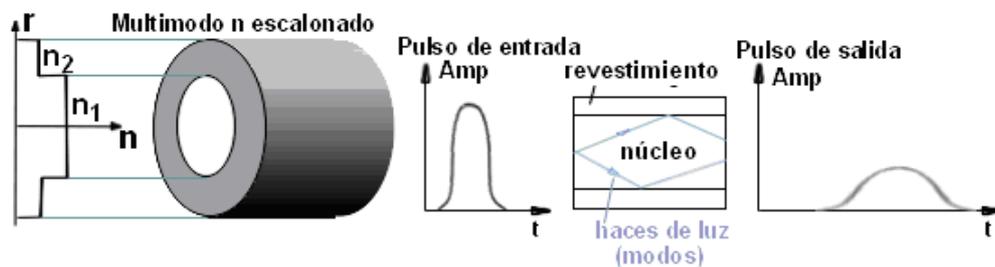


Fig. 2.3: Fibra óptica multimodo de índice escalonado.

Fuente: (Intelyde, 2014)

2.5.2.2 Fibra multimodo de índice gradual

Esta fibra puede utilizarse para transmisión analógica y digital; fue creada para reducir la dispersión que se produce en la fibra de índice escalonado. En esta fibra, el índice de refracción varía gradualmente del eje del núcleo al exterior, los rayos luminosos no son reflejados sino curvados según se aproximan al revestimiento. Los rayos que recorren un trayecto más largo permanecen más tiempo en la periferia de la fibra, donde el índice de refracción es menor y por tanto la velocidad de propagación es mayor, así los rayos que recorren mayores distancias se desplazan más rápidamente que los que cubren menor distancia y por tanto todos los rayos llegan casi al mismo tiempo al final del recorrido. Con esto

se logra mayor ancho de banda que las fibras multimodo de índice escalonado (AB = 500 a 1500 MHz/Km). El diámetro del núcleo en estas fibras es de 50 μm . (DUTARI DUTARI, 2012)

En la figura 2.4 podemos apreciar el comportamiento de los haces de luz en este tipo de fibra.

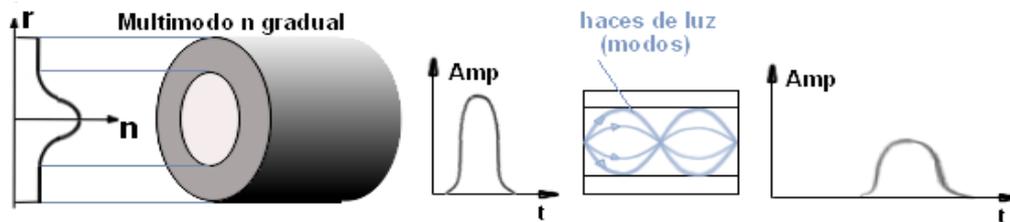


Fig. 2.4: Fibra óptica multimodo de índice gradual.

Fuente: (Intelyde, 2014)

2.6 Parámetros característicos de una fibra óptica

En la tabla 2.1 podemos observar un resumen de los parámetros característicos de la fibra óptica.

Tabla 2.1: *Parámetros característicos de la fibra óptica.*

Parámetros Estáticos	Opticos	Apertura Numérica Perfil del Índice de Refracción
	Geométricos	Diámetro del Núcleo Diámetro del Revestimiento Excentricidad No Circularidad del Núcleo No Circularidad del Revestimiento
Parámetros Dinámicos	Atenuación	Intrínseca de la Fibra Por causas Externas
	Dispersión Temporal	Dispersión Modal Dispersión del Material Dispersión por Efecto de Guia de Ondas

Fuente: *(Tecnoficios, 2014)*

2.6.1 Parámetros estáticos

Dentro de las tolerancias propias de fabricación, son constantes a lo largo de la fibra. Trata de las características ópticas y geométricas de la fibra. Las características geométricas van en función de la tecnología, usada en la fabricación de las fibras.

2.6.1.1 La apertura numérica

Determina la cantidad de luz que puede admitir una fibra óptica, independientemente de la calidad de información. (UM, 2014)

$$A.N. = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2}$$

Donde: A.N. varía de 0.1 a 0.5

Mientras mayor sea la apertura numérica, mayor será la cantidad de luz que acepta la fibra (mejor acoplamiento); pero la atenuación también aumentará y por ende su ancho de banda disminuirá.

Para que un rayo pueda propagarse a lo largo de una fibra debe estar dentro del límite, llamado “cono de admisión” (figura 2.5)

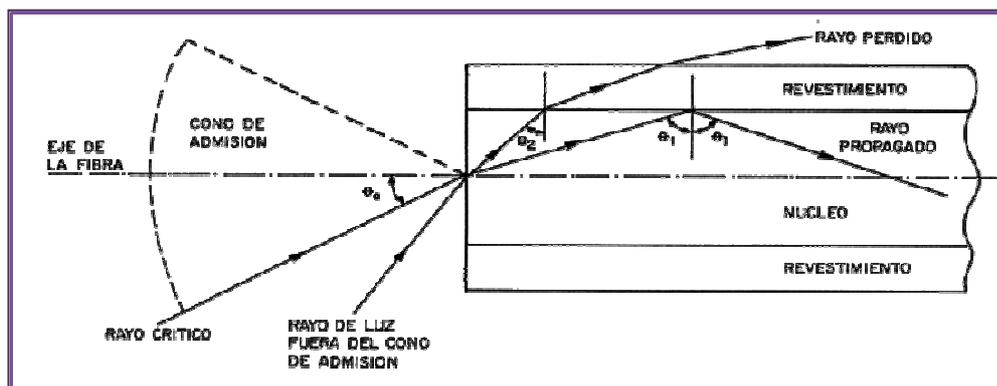


Fig. 2.5: Cono de admisión de una fibra óptica.

Fuente: (Intelyde, 2014)

2.6.1.2 Perfil del índice de refracción

El perfil de índice de refracción de la fibra es el índice de refracción a lo largo de un diámetro de fibra. Se conoce como índice de refracción a la relación:

$$n = c/v$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s) y v es la velocidad de la luz en otro medio (UM, 2014). En el vacío: $v = c$, por tanto $n = 1$. En cualquier otro medio la velocidad de la luz v siempre va a ser menor que c . Por lo general n es constante, aunque posee cierta dependencia con la temperatura, la longitud de onda (λ) y la presión.

La propagación en las fibras se realiza mediante un fenómeno de guías de ondas, constituido a base de dos índices de refracción n_1 y n_2 tal que $n_1 > n_2$ (UM, 2014), donde:

n_1 : perfil del índice del núcleo.

n_2 : perfil del índice del revestimiento.

En la figura 2.6 se puede observar los diferentes perfiles de índice de refracción de la fibra.

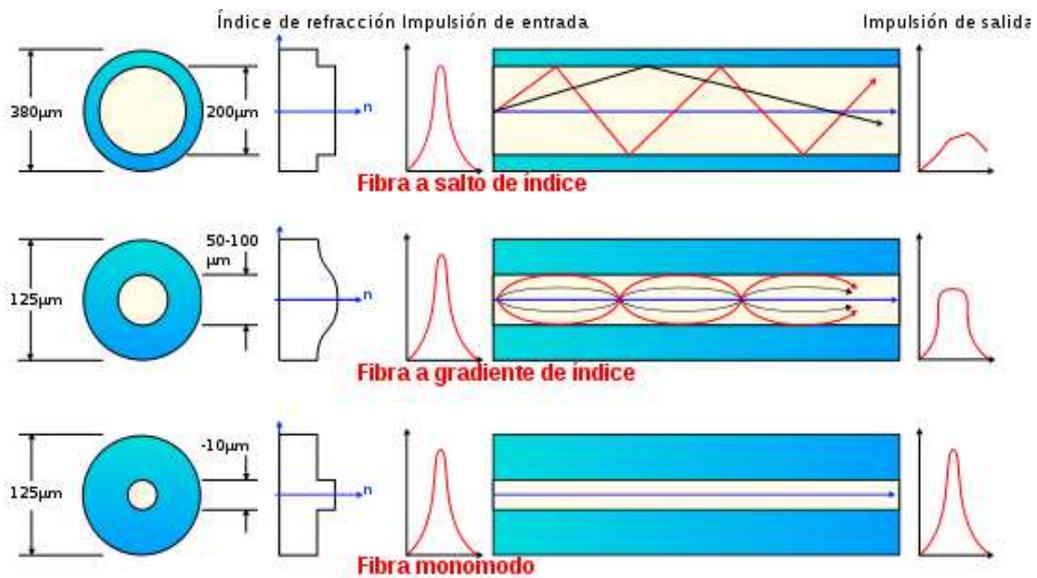


Fig. 2.6: Perfiles de índice de refracción de la fibra.

Fuente: (Ledezma Milanez, 2014)

2.6.1.3 Diámetro del núcleo

Según recomendación UIT-T G.651, para fibras multimodo de índice gradual, “el valor nominal recomendado del diámetro del núcleo es 50 μm; y la desviación del diámetro del núcleo no debe exceder los límites de $\pm 6\%$ ($\pm 3 \mu\text{m}$)”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.652, para fibras monomodo, “el valor nominal del diámetro del campo modal a 1310 nm está en la gama de 8,6 a 9,5 μm; y la

desviación del diámetro del campo modal no debe exceder los límites de $\pm 10\%$ ($\pm 0,6 \mu\text{m}$). (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.653, para fibras monomodo, “el valor nominal del diámetro del campo modal a 1550 nm está en la gama de 7,8 a 8,5 μm ; y la desviación del diámetro del campo modal no debe exceder los límites de $\pm 0,6 \mu\text{m}$ para la categoría A y $\pm 0,8 \mu\text{m}$ para la categoría B”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.655, para fibras monomodo, “el valor nominal del diámetro del campo modal a 1550 nm está en la gama de 8 a 11 μm ; y la desviación del diámetro del campo modal no debe exceder los límites de $\pm 0,7 \mu\text{m}$ para la categoría C y $\pm 0,6 \mu\text{m}$ para la categoría D y E”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.657, para fibras monomodo, “el valor nominal del diámetro del campo modal a 1310 nm está en la gama de 8,6 a 9,5 μm ; y la desviación del diámetro del campo modal no debe exceder los límites de $\pm 0,4 \mu\text{m}$ ”. (UIT, 2014)

2.6.1.4 Diámetro del revestimiento

Según recomendación UIT-T G.651, “El valor nominal recomendado del diámetro del revestimiento es 125 μm . La desviación del diámetro del revestimiento no debe exceder de $\pm 2,4\%$ ($\pm 3 \mu\text{m}$)”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.652, UIT-T G.653 y UIT-T G.655, “El valor nominal recomendado del diámetro del revestimiento es 125 μm . La desviación del diámetro del revestimiento no debe exceder de $\pm 1 \mu\text{m}$ ”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.657, “El valor nominal recomendado del diámetro del revestimiento es 125 μm . La desviación del diámetro del revestimiento no debe exceder de $\pm 0,7 \mu\text{m}$ ”. (UIT, 2014)

2.6.1.5 Error de concentricidad.

Según recomendación UIT-T G.651, para fibras multimodo de índice gradual, “se pide que el error de concentricidad del núcleo sea inferior al 6%”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.652, para fibras monomodo, “El error de concentricidad para el campo modal no debe exceder de 0,6 μm ”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.653, para fibras monomodo, “El error de concentricidad para el campo modal no debe exceder de 0,8 μm para la categoría A y 0,6 μm para la categoría B”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.655, para fibras monomodo, “El error de concentricidad para el campo modal no debe exceder de 0,8 μm para la categoría C y 0,6 μm para la categoría D y E”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.657, para fibras monomodo, “El error de concentricidad para el campo modal no debe exceder de 0,5 μm ”. (UIT, 2014)

2.6.1.6 No circularidad del núcleo

Según recomendación UIT-T G.651, para fibras multimodo de índice gradual, “se recomienda que la no circularidad del núcleo sea inferior al 6%”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.652, UIT-T G.653, UIT-T G.655, UIT-T G.657. “En la práctica, la no circularidad del campo modal de las fibras que tienen campos modales nominalmente circulares es lo suficientemente baja como para que la propagación y los empalmes no se vean afectados. En consecuencia, no se

considera necesario recomendar un valor determinado de no circularidad del campo modal. En general, no es necesario medir la no circularidad del campo modal con fines de aceptación”. (UIT, 2014)

2.6.1.7 No circularidad del revestimiento

Según recomendación UIT-T G.651. “La no circularidad del revestimiento debe ser inferior al 2%”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.652. “La no circularidad del revestimiento debe ser inferior al 1%”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.653. “La no circularidad del revestimiento debe ser inferior al 2% en la categoría A y 1% en la categoría B”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.655. “La no circularidad del revestimiento debe ser inferior al 2% en la categoría C, 1% en la categoría D y E”. (UIT, 2014)

Según recomendación UIT-T G.657. “La no circularidad del revestimiento debe ser inferior al 1%”. (UIT, 2014)

2.6.2 Parámetros dinámicos

Son características de la fibra óptica que afectan la progresión de la señal a lo largo de la misma. Dentro de los parámetros dinámicos de la fibra se encuentran las atenuaciones, pérdidas extrínsecas e intrínsecas, así como las dispersiones de tipo modal, del material, por efecto de guía de ondas.

2.6.2.1 Pérdidas y atenuación en la fibra

La atenuación, es la pérdida de potencia luminosa que sufren los impulsos de luz a lo largo de la fibra. (UM, 2014) Es decir, dichas pérdidas en la fibra representan otro factor limitante ya que reducen la potencia de señal que alcanzan los receptores. Como los receptores ópticos necesitan cierta cantidad de energía mínima para la recuperación de la señal con precisión, la distancia de transmisión está limitada por las pérdidas en la fibra. En la figura 2.7 podemos apreciar los motivos de las pérdidas.

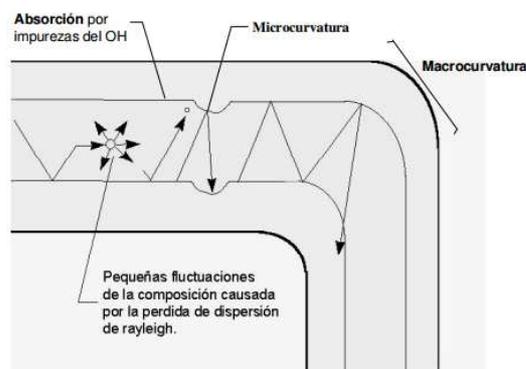


Fig. 2.7: Motivos de la pérdida.

Fuente: (UM, 2014)

En efecto, el uso de fibras de sílice para la comunicación óptica se empleó en la práctica solo cuando las pérdidas fueron reducidas a un nivel aceptable. Con el advenimiento de los amplificadores ópticos las distancias de transmisión pueden superar los varios miles de kilómetros por compensar las pérdidas acumuladas de forma periódica. Sin embargo, las bajas pérdidas en las fibras todavía requieren del espaciamiento entre los amplificadores que se establece por las pérdidas en la fibra. (UM, 2014). Las pérdidas de luz en la fibra pueden dividirse en:

➤ **Pérdidas por absorción intrínseca.**

La absorción intrínseca es un mecanismo por el cual, parte de la potencia óptica se disipa en la fibra en forma de calor. Se debe a la interacción entre fotones y vibraciones moleculares. (UM, 2014)

Esta absorción es importante por debajo de $0,8\mu\text{m}$ (ultravioleta) y por encima de $1,1\mu\text{m}$ (infrarrojo), como se muestra en la figura 2.8.

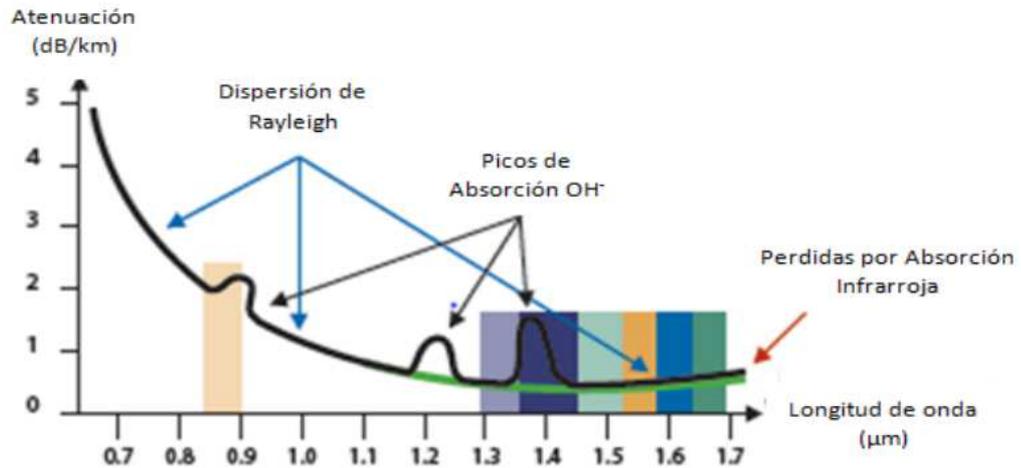


Fig. 2.8: Diagrama de atenuación en una fibra.

Fuente: (Ruíz Gutiérrez, 2012)

➤ Pérdidas por esparcimiento intrínseco

También se conoce como “pérdidas por esparcimiento de Rayleigh” (UM, 2014). Están originadas por fluctuaciones aleatorias en el índice de refracción, de tamaño menor que el de la longitud de onda. Estas irregularidades provocan que una parte de la señal óptica sufra pequeñas reflexiones, originándose de este modo una atenuación que es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda.

Las fluctuaciones del índice que motivan el esparcimiento Rayleigh se producen por irregularidades en el material, pequeñas burbujas, etc.

➤ **Pérdidas extrínsecas**

Se deben a defectos de fabricación. Se clasifican en:

- Por contaminación del vidrio.
- Por curvado de la fibra.
- Por irregularidades periódicas en la geometría de la fibra.

2.6.2.2 Dispersión temporal

Es un fenómeno que ocurre cuando un impulso luminoso se transmite a través de una fibra óptica y experimenta un ensanchamiento en el tiempo. Este ensanchamiento, cuya magnitud estará en función de la longitud de la fibra, limita el ancho de banda y por tanto la capacidad de la fibra para transmitir información. El fenómeno de dispersión se debe principalmente a los siguientes mecanismos:

➤ **Dispersión modal**

La dispersión modal se debe a que en cada uno de los modos en que se descompone la mediación luminosa que accede al núcleo, sigue una trayectoria distinta, ver figura 2.9. Esta diferencia se traduce en que los distintos modos emplean tiempos diferentes en recorrer la misma longitud de fibra, con lo que aparecen retardos relativos entre modos en el extremo distante de la fibra, dando

lugar a un ensanchamiento de los impulsos. A este tipo de dispersión, por producirse entre modos distintos también se le conoce como dispersión intermodal. (MARTÍNEZ CONTRERAS, 2009)

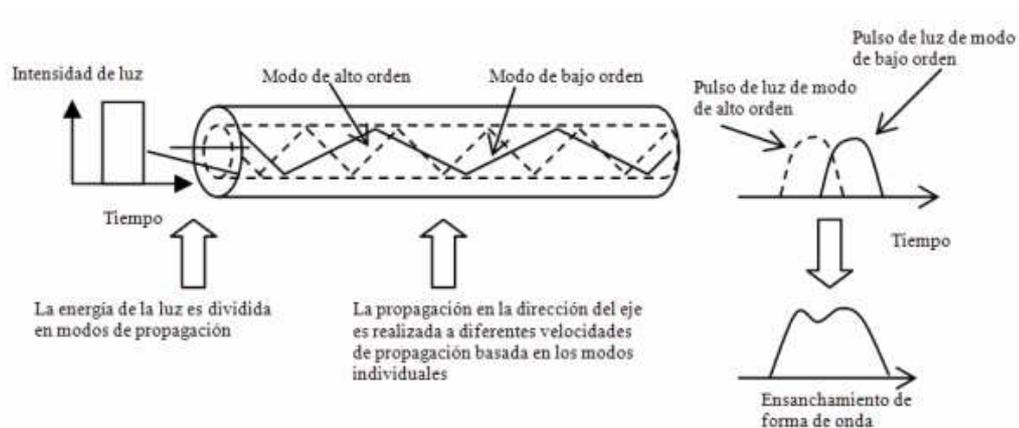


Fig. 2.9: *Dispersión modal.*

Fuente: (MARTÍNEZ CONTRERAS, 2009)

➤ **Dispersión espectral o del material**

La dispersión espectral o del material, que se traduce también en un ensanchamiento del pulso, se debe a que el ancho espectral de los emisores ópticos utilizados en la práctica (LED o LD) no es cero y a que el índice de refracción no varía con la longitud de onda. (MARTÍNEZ CONTRERAS, 2009)

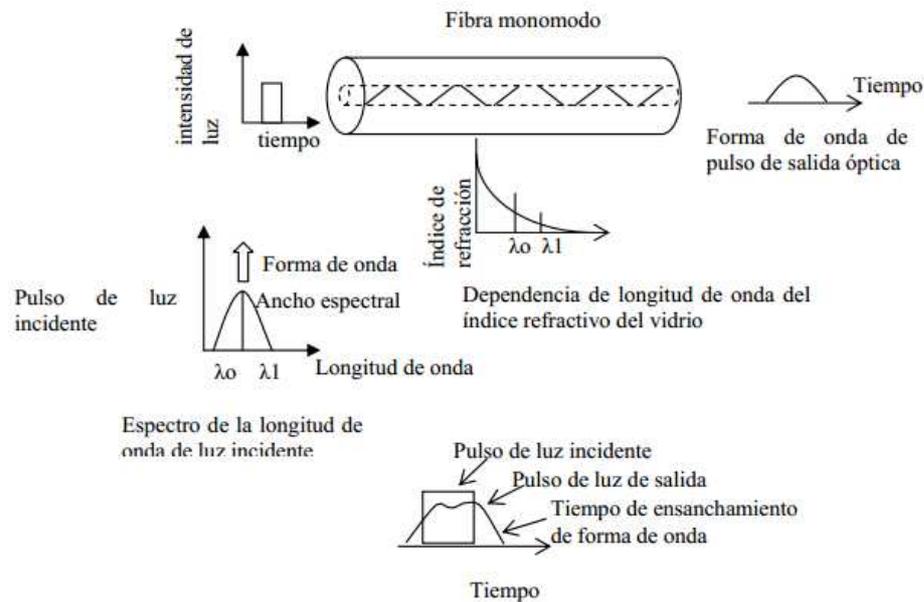


Fig. 2.10: *Dispersión del material.*

Fuente: (MARTÍNEZ CONTRERAS, 2009)

➤ **Dispersión por efecto de guía de ondas**

Está asociada con los efectos de guía de la estructura de la fibra, y solo es importante en las fibras monomodo. Esta dispersión es también de carácter intramodal, estando unida en su origen físico a la dispersión cromática, y debida principalmente a la dependencia de la longitud de onda con la frecuencia normalizada. (MARTÍNEZ CONTRERAS, 2009)

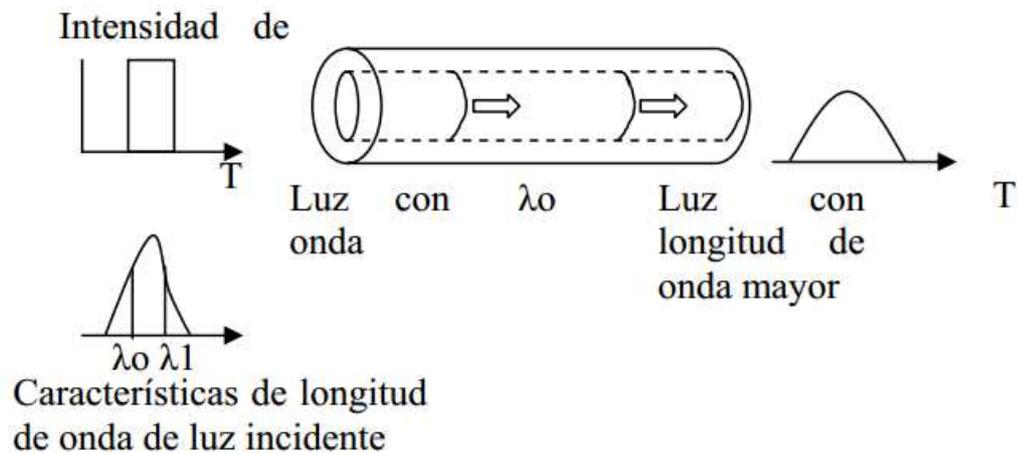


Fig. 2.11: *Dispersión por efecto de guía de ondas.*

Fuente: (MARTÍNEZ CONTRERAS, 2009)

2.7 Longitud de onda de corte

La longitud de onda de corte para cualquier modo se define como la máxima longitud de onda a la que un modo se propaga. La longitud de onda de corte (λ_c) del modo LP_{11} es una especificación importante para una fibra monomodo. El valor de la longitud de onda debe ser mayor que el de la longitud de onda de corte del modo LP_{11} para que la fibra opere en el régimen monomodo. La λ_c puede ser determinada de forma analítica para algunas especificaciones de perfiles de fibras ópticas. Para un perfil de fibra general, un calculador numérico de modos con un alto nivel de exactitud puede ser utilizado para obtener la longitud de onda de corte (λ_c).

Para determinar matemáticamente la resolución de la longitud de onda de corte, se implementan dos métodos diferentes y en consecuencia, dos valores diferentes pueden ser calculados para cada modo:

- **Un valor teórico de longitud de onda de corte:** Este es la longitud de onda por encima de la cual un modo no puede propagarse aún en un tramo pequeño de fibra sin perturbaciones. Este valor se calcula utilizando un método numérico general para la resolución de modos que está presente entre los algoritmos que emplea el software OptiFiber. Este valor se define como la longitud de onda por encima de la cual los valores formulados para el diseño de una fibra determinada no tienen solución en el dominio de los números reales \mathbb{R} .
- **Un valor estimado por la UIT-T:** Estos valores se obtienen mediante la simulación de las mediciones experimentales de longitudes de onda de corte, tal y como se muestran en las recomendaciones de la UIT-T. Emplea una fórmula para pérdidas por macro curvaturas, aplicable a cualquier modo en un perfil de índice de refracción de fibras ópticas. Las recomendaciones de la UIT-T están formuladas solo para la longitud de onda de corte del modo LP_{11} . (UIT, 2014)

De acuerdo con las dos definiciones citadas, una longitud de onda de corte no está definida para el modo fundamental. Además, en ocasiones para eliminar combinaciones inapropiadas de parámetros, el modo fundamental se puede resolver mediante una condición que se denomina “longitud de onda de corte numérica”.

2.8 Birrefringencia

Esta es otra característica de la fibra óptica. La birrefringencia, en una fibra óptica monomodo, se describe usando la óptica de polarización desarrollada para muestras en las que el fenómeno de guiado de la luz no se considera. El parámetro comúnmente utilizado para caracterizar su birrefringencia es la longitud de batimiento de la polarización; la cual generalmente se mide usando un polariscopio nulo y la técnica de barrido espectral. (Tentori, Ayala Díaz, & Treviño Martínez, 2008)

El polariscopio lineal nulo está formado por una fuente de luz colimada circularmente polarizada, un polarizador lineal, un analizador (polarizador lineal con su eje ortogonal al del polarizador de entrada) y un detector, como se muestra en la figura 2.12. (Tentori, Ayala Díaz, & Treviño Martínez, 2008)



Fig. 2.12: *Polariscopio lineal nulo.*

Fuente: (Tentori, Ayala Díaz, & Treviño Martínez, 2008)

La muestra se coloca entre el polarizador y el analizador. Cuando la muestra es una fibra monomodo, el haz de luz colimada transmitido por el polarizador de entrada se acopla a la fibra usando una lente. A la salida de la fibra, la señal se colima usando otra lente y se envía al analizador y a continuación al detector. (Tentori, Ayala Díaz, & Treviño Martínez, 2008)

Una alternativa basada también en el método de barrido espectral, consiste en trazar sobre la esfera de Poincaré (una herramienta gráfica que permite una descripción conveniente de las señales polarizadas y las transformaciones de polarización durante la propagación), los estados de polarización a la salida de la muestra. Al trabajar con la esfera de Poincaré se representa el campo eléctrico usando los vectores de Stokes y la birrefringencia de la fibra se describe usando matrices de Mueller. (Tentori, Ayala Díaz, & Treviño Martínez, 2008)

La degradación natural de los modos polarizados ortogonales solo se alcanza para fibras monomodo ideales con un núcleo perfectamente cilíndrico de diámetro uniforme. Las fibras reales presentan una variación en la forma de su núcleo a lo largo de la longitud de la fibra. También se puede experimentar una tensión no uniforme, así como que la simetría cilíndrica de la fibra se rompa. La degradación entre los modos de fibra polarizados ortogonales es apartado a causa de estos factores, en consecuencia la fibra adquiere birrefringencia. (Tentori, Ayala Díaz, & Treviño Martínez, 2008)

Inconvenientemente en las fibras monomodo la birrefringencia no es constante a lo largo de la fibra, pero cambia aleatoriamente, ambos cambios en magnitud y dirección, a causa de las variaciones en la forma del núcleo (más elíptico que circular) y la tensión isotrópica que actúa en el núcleo. Como resultado, la luz viaja a través de la fibra con polarización lineal y rápidamente alcanza un estado de polarización arbitrario. Además, las diferentes componentes de frecuencia de un pulso adquieren diferentes estados de polarización, resultando un pulso de ensanchamiento. A este fenómeno se le conoce como Dispersión por Modo de Polarización (PMD) que se convierte en un factor limitante para los sistemas de comunicaciones ópticos que operan con una alta tasa de bits.

2.9 Dispersión por Modo de Polarización (PMD)

La PMD es una limitante en los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad (≥ 10 Gbps) y de larga distancia; debido a que es la causante de los ensanchamientos de los pulsos ópticos transmitidos por una fibra óptica, y por consiguiente el aumento de la tasa de bit errónea (BER). (Leiva L., Tarifeño G., & Olivares V., 2007)

La PMD ocurre cuando las dos componentes ortogonales de polarización; llamados modos de polarización, del modo fundamental de propagación, viajan a distinta velocidad de grupo, llegando en distintos tiempos al final de la fibra óptica, ensanchando y distorsionando los pulsos. Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se denomina retardo diferencial de grupo (DGD). (Leiva L., Tarifeño G., & Olivares V., 2007)

Esta variación de la velocidad de grupo se produce por las características birrefringentes del medio de transmisión (fibra óptica). La birrefringencia es el cambio en el índice de refracción “n” de los ejes transversales de la fibra óptica, llamados ejes de birrefringencia. En otras palabras, cada modo de polarización de la luz se propagará en un medio con un valor distinto de índice de refracción, lo que implica que la señal original se comporta como dos ondas independientes que

viajan a velocidades diferentes a lo largo de la fibra óptica. (Leiva L., Tarifeño G., & Olivares V., 2007)

CAPÍTULO III

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL OPTIFIBER

El software OptiFiber es una poderosa herramienta que ofrece la posibilidad de diseñar y simular fibras ópticas de acuerdo a las características de éstas, tales como; los índices de refracción, el diámetro del núcleo, el diámetro del revestimiento, etc. Estas características varían según el tipo de fibra que se escoja para diseñar. Además, permite el cálculo de la dispersión, las pérdidas, la birrefringencia y PMD de una fibra óptica.

3.1 Principales aplicaciones

- Evaluar parámetros, sensibilidades, y tolerancias.
- La resolución de modo de fibra LP o modos del vector por diferencias finitas o por métodos matriciales de transferencia.
- Análisis de perfiles de fibra medidos a partir de instrumentos tales como el EXFO NR-9200.
- Diseños de fibra monomodo, como Corning SMF-28, dispersión aplanada o desplazamiento de fibras.

- Diseño de fibra multimodo, como 50/125 y 62.5 m / 125 m fibras de sílice.
- La visualización de patrones de interferencia multimodal con propagación.
- La exploración automática de parámetros.
- Diseño de sensores de fibra.
- Cálculo de la birrefringencia y PMD de las perturbaciones intrínsecas o extrínsecas.

3.2 Características generales del software OptiFiber

Para un diseño eficiente de fibra óptica, se debe tener conocimiento de determinados valores de una fibra real. Esta información la brindan las recomendaciones existentes para los distintos tipos de fibra. En la figura 3.1 se muestra el área de trabajo del software OptiFiber.



Fig. 3.1: Área de trabajo del software OptiFiber.

En la parte superior del área de trabajo, se encuentra la barra de menú y la barra de herramientas. En la parte inferior del área de trabajo se encuentra una serie de ventanas que mostrarán los gráficos resultantes de la simulación.

3.3 Pasos para el diseño de una fibra óptica en el software OptiFiber

El primer paso para empezar el diseño y simulación de una fibra óptica, es definir el perfil de la fibra; para esto, hay que hacer clic en el ícono “Design fiber”, que se encuentra en la parte superior izquierda, como se observa en la figura 3.2.

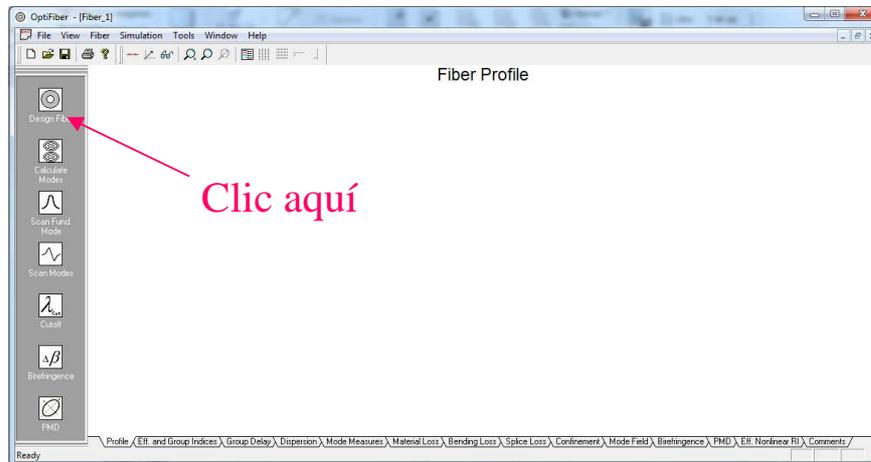


Fig. 3.2: Muestra cómo empezar el diseño.

Al hacer clic en ese ícono, aparecerá una ventana en la que debemos seleccionar el tipo de perfil, seguido de hacer clic en “OK”; en este caso será la opción perfil de índice de refracción (Refractive Index Profile), como se muestra en la figura 3.3. En aquellos casos donde no se conocen los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, se escoge el perfil de distribución de concentración del dopante (Dopant Concentration Distribution).

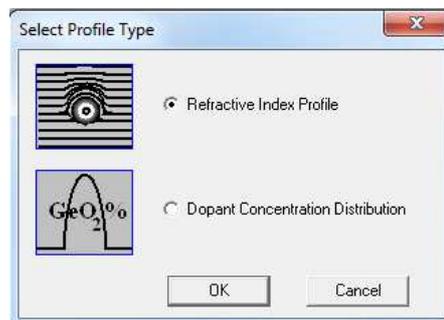


Fig. 3.3: Ventana que muestra la selección del tipo de perfil.

Luego de haber seleccionado el tipo de perfil aparece una nueva ventana (figura 3.4) en la que se deben crear las regiones de núcleo y revestimiento; y de la misma manera ingresar los datos correspondientes, los cuales los podemos encontrar en las recomendaciones de la UIT. Además, estos datos deben ir según el tipo de fibra a diseñar.

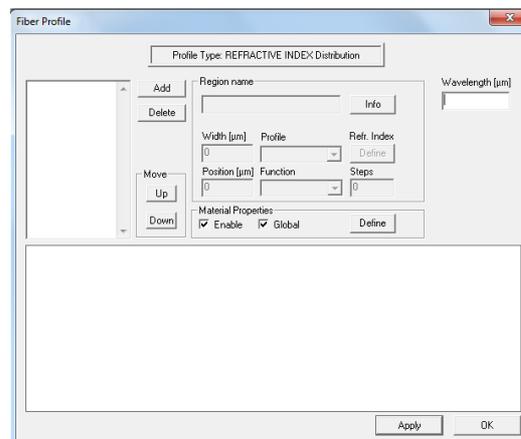


Fig. 3.4: Ventana donde se deben ingresar los datos referentes al núcleo y revestimiento.

El siguiente paso es definir modelos de dispersión; para esto se debe determinar las propiedades del material. Haciendo clic en “Define”, que se encuentra en la parte de propiedades del material, en la misma ventana (figura 3.5), podemos tener acceso a la ventana “Material Properties” (Propiedades del material), como se puede observar en la figura 3.6.

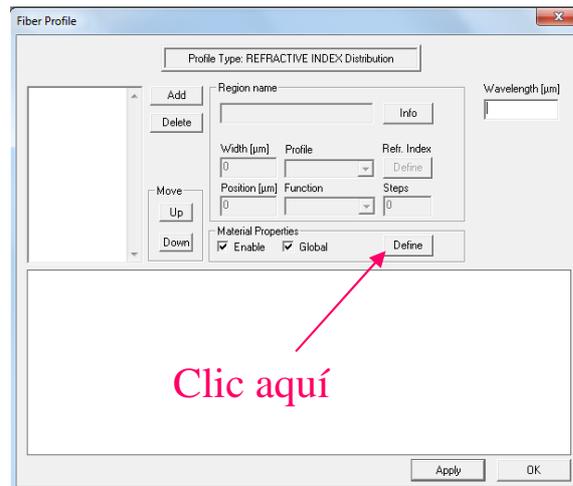


Fig. 3.5: Como ingresar a propiedades del material.

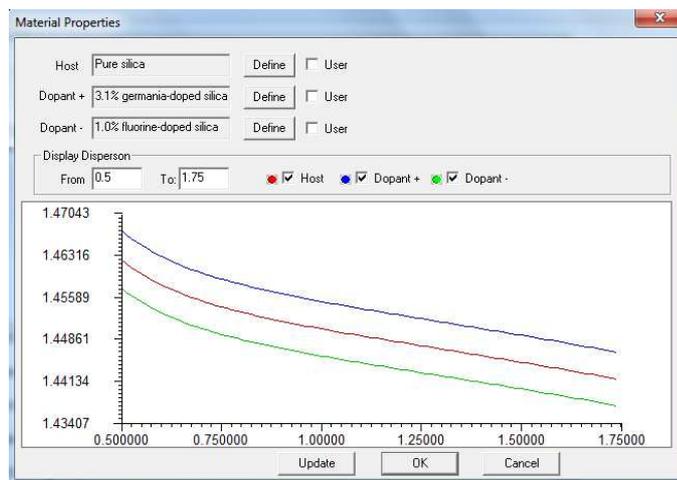


Fig. 3.6: Ventana donde se establecen las propiedades del material.

Ya que éste software es una herramienta muy completa, seguido de estos pasos para el diseño, se puede realizar el cálculo de los modos de fibra, el cálculo de la longitud de onda de corte, simulación de la birrefringencia y del PMD, etc.

CAPÍTULO IV

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA MONOMODO EN EL SOFTWARE OPTIFIBER

Para la simulación de una fibra, primeramente se deben seguir los pasos anteriormente descritos, luego se podrán observar los resultados obtenidos de dicha fibra. Para el diseño de esta fibra se tienen los siguientes datos:

- Diámetro del núcleo = $8.3 \mu\text{m}$
- Diámetro del revestimiento = $125 \mu\text{m}$
- Índice de refracción del núcleo = 1.45213
- Índice de refracción del revestimiento = 1.44692
- Longitud de onda = $1.3 \mu\text{m}$

En la figura 4.1 se muestran los datos ingresados para una fibra monomodo de la Recomendación G.652 de la UIT-T que establece las características de un cable de fibra óptica monomodo.

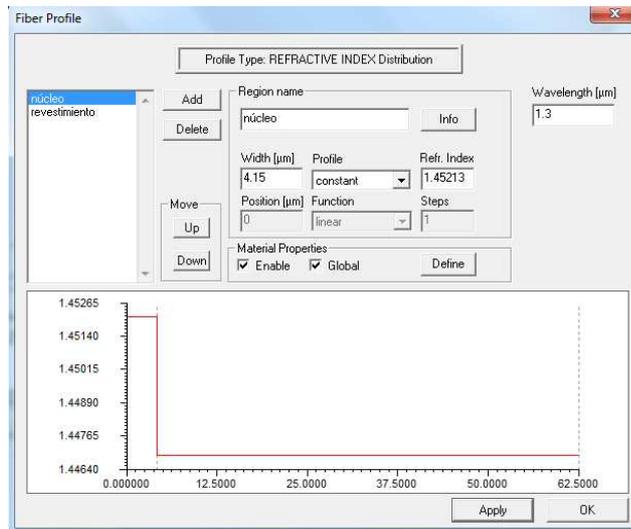


Fig. 4.1: Creación de la región del núcleo y del revestimiento para la fibra monomodo G.652

4.1 Perfil de la fibra

Se puede observar en la figura 4.2 cómo queda el perfil de índice de refracción de la fibra monomodo G.652, después de haber ingresado los datos correspondientes a las regiones del núcleo y del revestimiento.

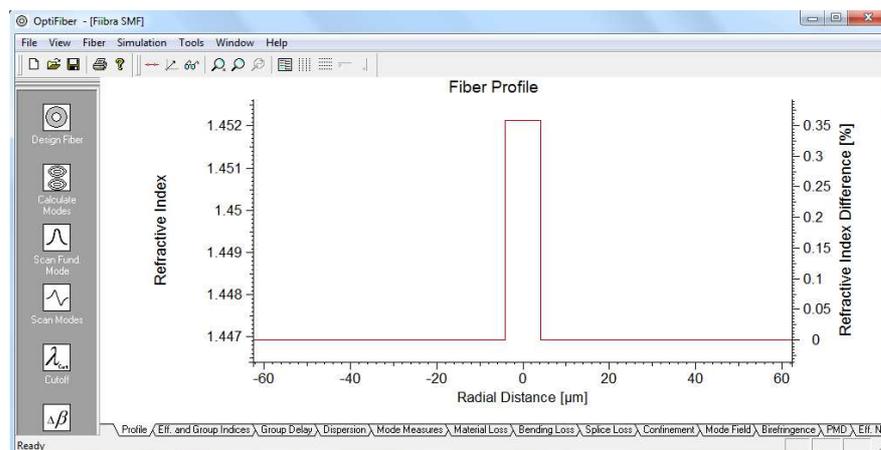


Fig. 4.2: Perfil de la fibra monomodo G. 652.

4.2 Variación del índice gradual y del índice de grupo

La figura 4.3 presenta la variación del índice gradual y del índice de grupo con la longitud de onda para la fibra monomodo G.652. Estos elementos están relacionados con la dispersión del material, que da una medida de la variación del índice de refracción de grupo para diferentes longitudes de onda.

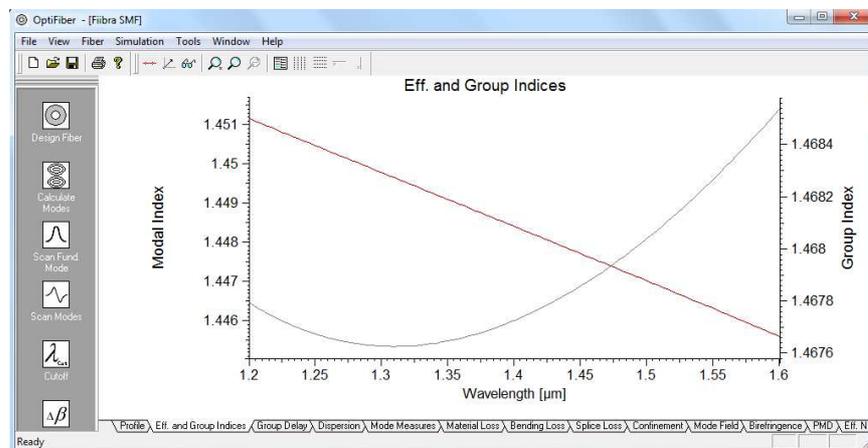


Fig. 4.3: Variación del índice gradual y del índice de grupo con la longitud de onda.

4.3 Dispersión cromática o intramodal

La dispersión intramodal se debe a la dispersión del material y a la dispersión a causa de la guía de onda. La dispersión del material ocurre a causa de que el índice de refracción de la sílice, el material mayormente usado en las fibras ópticas, cambia con la frecuencia óptica.

En la figura 4.4 se puede apreciar que la dispersión total para una longitud de onda de 1309.1nm es igual a 0 ps/km.nm.

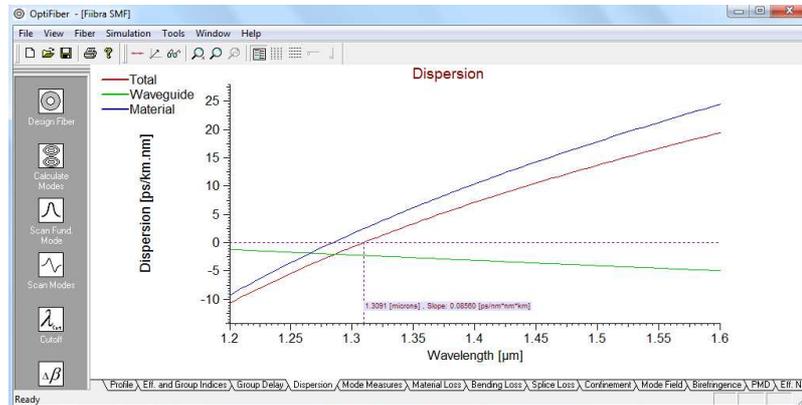


Fig.4.4: *Dispersión cromática en la fibra monomodo G.652.*

4.4 Pérdidas del material

La potencia de la señal en los receptores sufre de atenuación producto de las pérdidas que ocurren en el interior de la fibra, independientemente del tipo de fibra que se utilice (monomodo o multimodo). La distancia de transmisión está limitada por éstas pérdidas.

Las pérdidas del material son las pérdidas determinantes en la fibra óptica; las cuales incluyen, dispersión de Rayleigh (RS), ultravioleta (UV), absorción infrarroja (IR) y pérdidas por absorción de iones hidroxilo (OH).

En la figura 4.5 se observa cómo influyen las pérdidas del material en la fibra, y que la dispersión de Rayleigh (RS) es la que mayor influencia negativa tiene sobre la fibra con un valor máximo de 2.19727 dB/km y un valor mínimo de 0.140076 dB/km. También se observa que las pérdidas del material son mínimas cerca de los 1310 nm.

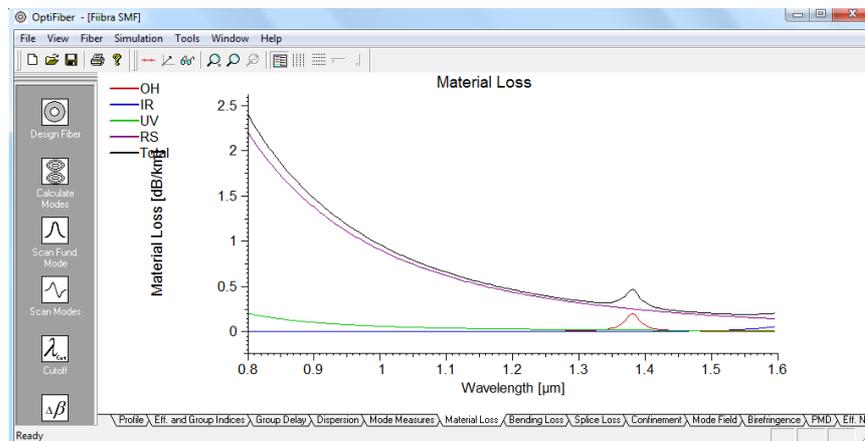


Fig. 4.5: Pérdidas del material para la fibra monomodo G.652.

4.5 Pérdidas por curvaturas

En la figura 4.6 se aprecian las pérdidas por curvaturas en la fibra monomodo G.652. Cuando estas pérdidas tienen lugar en la fibra, se origina una atenuación adicional producto de la fuga de modos que se originó en el núcleo de la fibra.

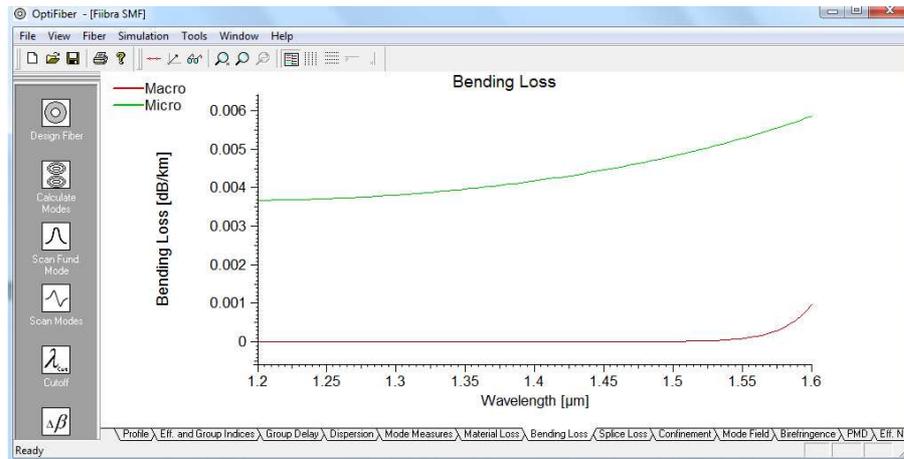


Fig. 4.6: Pérdidas por curvaturas en la fibra monomodo G.652.

En los resultados obtenidos se puede observar que las pérdidas por macro curvaturas son nulas hasta que llegan a un punto donde se originan. También se puede ver que para la región de trabajo de 1310 nm (región de trabajo de una fibra monomodo G.652, según la UIT) no existen afectaciones por macro curvaturas.

4.6 Pérdidas por empalme

En la figura 4.7 podemos observar como varían las pérdidas por empalmes en la fibra monomodo G.652, con la longitud de onda.

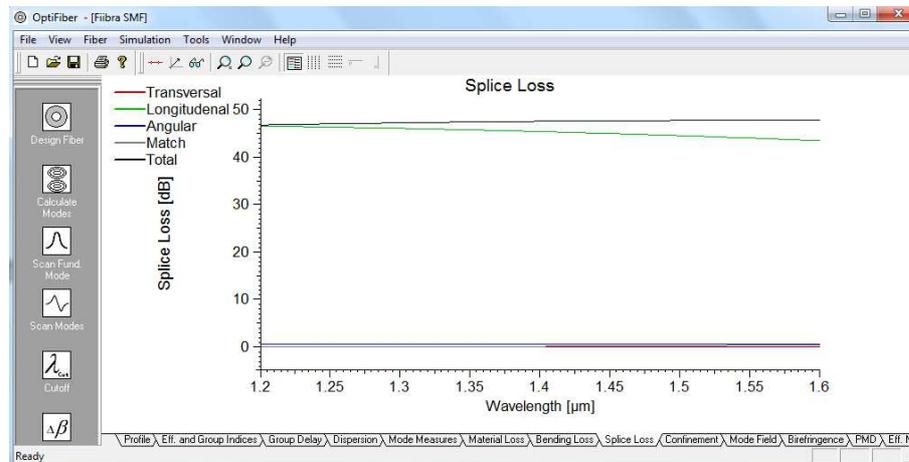


Fig. 4.7: *Perdidas por empalmes en la fibra monomodo G. 652*

4.7 Confinamiento de la fibra

En la figura 4.8 se muestra el confinamiento de la fibra monomodo G.652. Con ello se demuestra que solo el modo fundamental LP (0,1) se propaga por el núcleo de la fibra y que este resultado obtenido coincide con el normado por la Recomendación G.652 para una fibra monomodo.

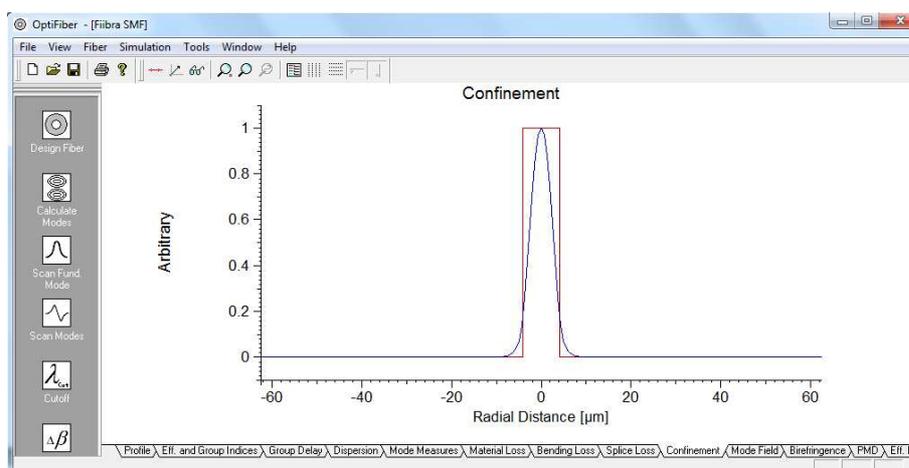


Fig. 4.8: *Confinamiento de la fibra monomodo G.652.*

4.8 Campo Modal

En la figura 4.9 se observa la intensidad del campo a través del núcleo. En el centro se observa la mayor intensidad del campo; es decir, que brinda una máxima potencia de transmisión a través de la guía de onda.

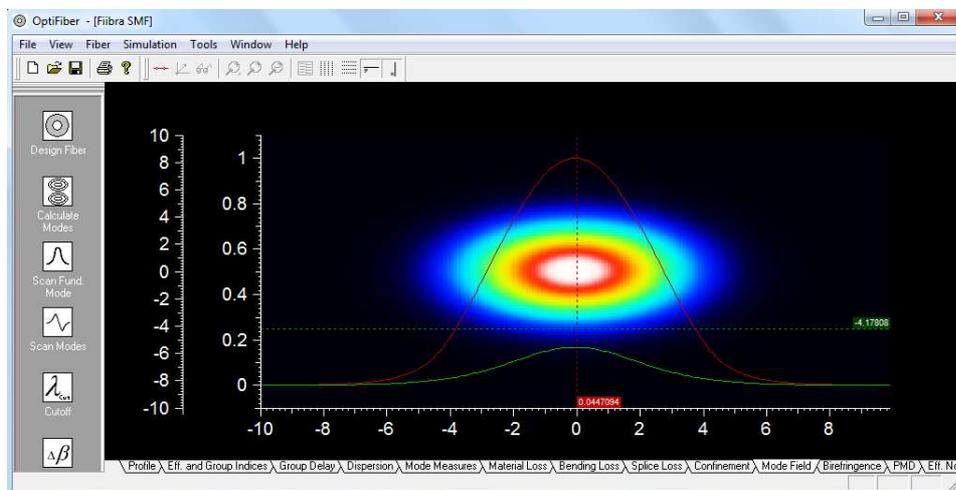


Fig. 4.9: *Modo fundamental LP (0.1) para la fibra monomodo G.652.*

4.9 Birrefringencia

En la fig. 4.10 se puede observar el resultado de la simulación de la birrefringencia en la fibra monomodo G.652; además, se puede apreciar que la birrefringencia no es constante; es decir, varía a lo largo de la fibra.

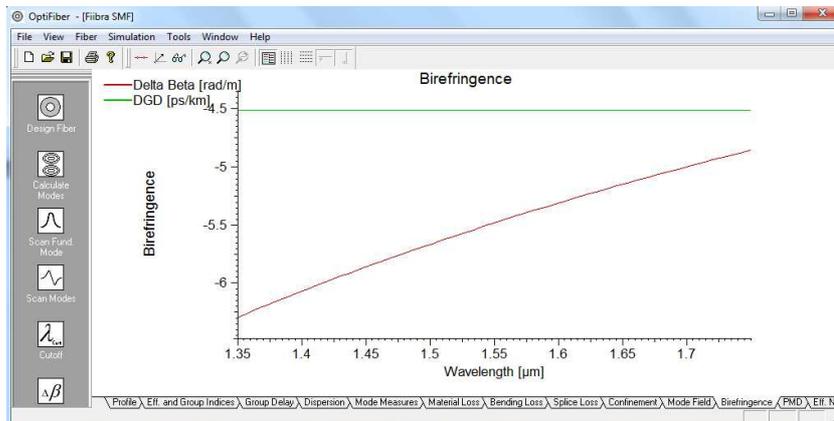


Fig. 4.10: Birrefringencia en la fibra monomodo G. 652.

4.10 Dispersión por Modo de Polarización (PMD)

En la figura 4.11 se aprecia el PMD que se obtuvo en la simulación. Los cables de fibra óptica tratados en la recomendación G.652, tienen generalmente un coeficiente de dispersión por modo de polarización por debajo de 0,5. En la figura 4.12 se puede observar el valor medio y el error medio de los valores de primer orden y segundo orden de PMD.

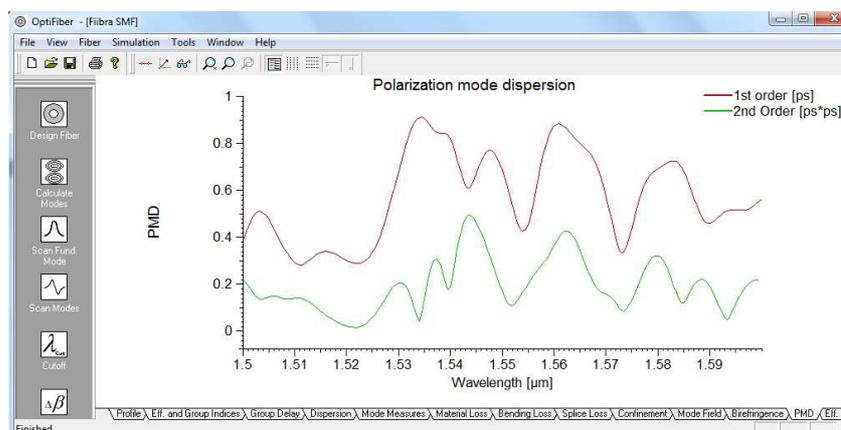


Fig. 4.11: Dispersión por Modo de Polarización en la fibra monomodo G.652.

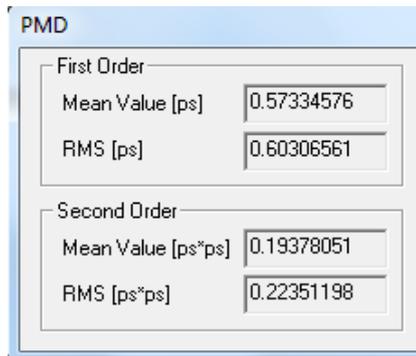


Fig. 4.12: Valor medio y error medio de PMD.

4.11 Cálculo de la longitud de onda de corte

La longitud de onda de corte es la longitud por encima de la cual ningún modo puede propagarse. Para calcular de una manera rápida y sencilla la longitud de onda de corte en una fibra monomodo se emplean las herramientas del software OptiFiber.

Los pasos a seguir son los siguientes: Hacer clic en “Cut off” para que se abra una ventana, donde debemos seleccionar “LP Modes (Matrix method)”; luego hacer clic en “Recalculate”, y listo. Ver figura 4.11.

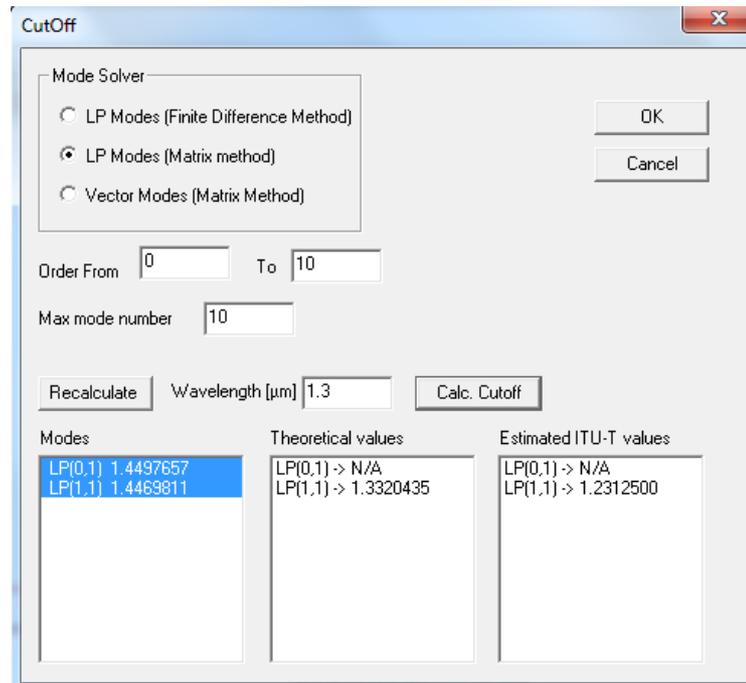


Fig. 4.13: Cálculo de la longitud de onda de corte.

CAPÍTULO V

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA MULTIMODO EN EL SOFTWARE OPTIFIBER

La fibra óptica multimodo que se va a diseñar en este capítulo, es la mencionada en la recomendación G.651 de la UIT; para esto, se siguen los mismos pasos que para la fibra óptica monomodo G.652. Los datos son los siguientes:

- Diámetro del núcleo = 50 μm
- Diámetro del revestimiento = 125 μm
- Índice de refracción del núcleo = 1.4612
- Índice de refracción del revestimiento = 1.4468
- Longitud de onda = 1.3 μm

En la fig. 5.1 se muestra la creación de las regiones del núcleo y del revestimiento según la Recomendación G.651 donde se establecen las características de un cable de fibra óptica multimodo de índice gradual de 50/125 μm .

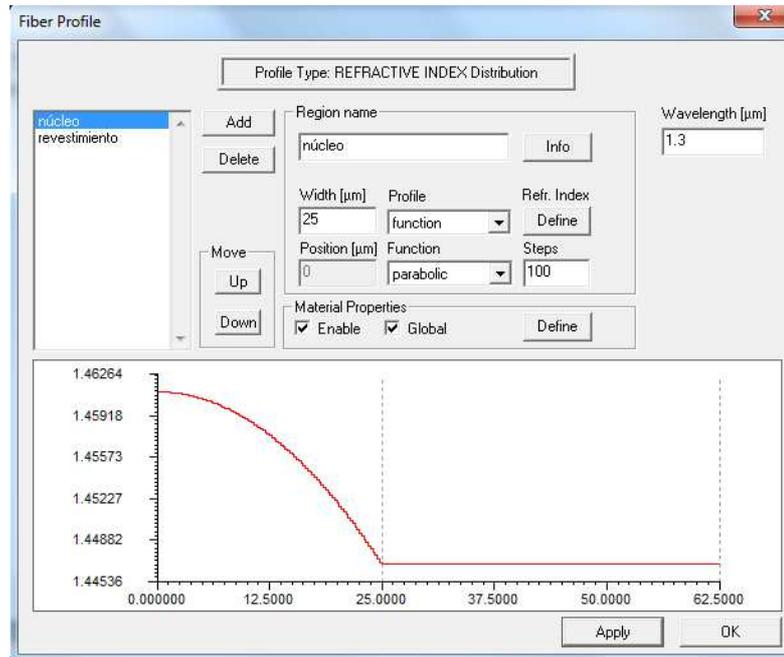


Fig. 5.1: Creación de la región del núcleo y del revestimiento para la fibra monomodo G.651

Luego de haber ingresado los datos correspondientes podemos chequear los resultados obtenidos y compararlos con los de la UIT.

5.1 Perfil de la fibra

Ya ingresado los datos correspondientes de las regiones del núcleo y del revestimiento, el programa nos proyecta cómo queda el perfil de una fibra multimodo de índice gradual. Como se puede observar en la figura 5.2 el perfil de esta fibra es parabólico, como lo describe la recomendación G.651 de la UIT.

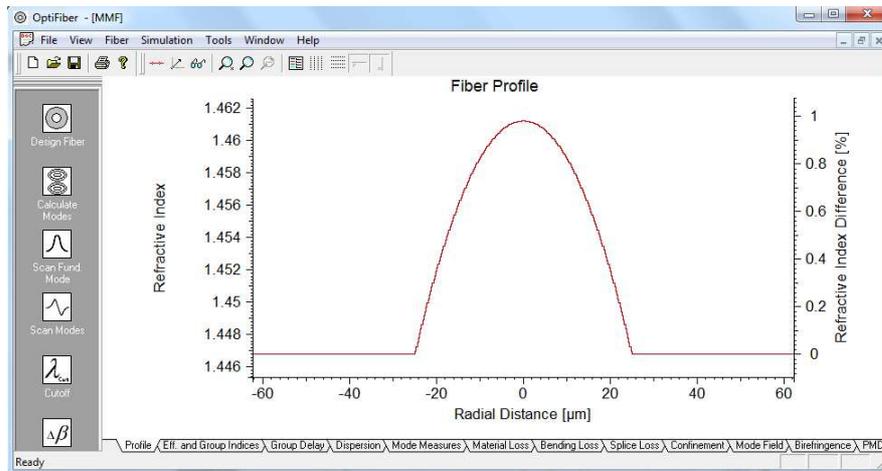


Fig. 5.2: Perfil de la fibra multimodo G. 651.

5.2 Variación del índice gradual y del índice de grupo

En la figura 5.3 se puede observar la variación del índice gradual y del índice de grupo con la longitud de onda para la fibra multimodo G.651.

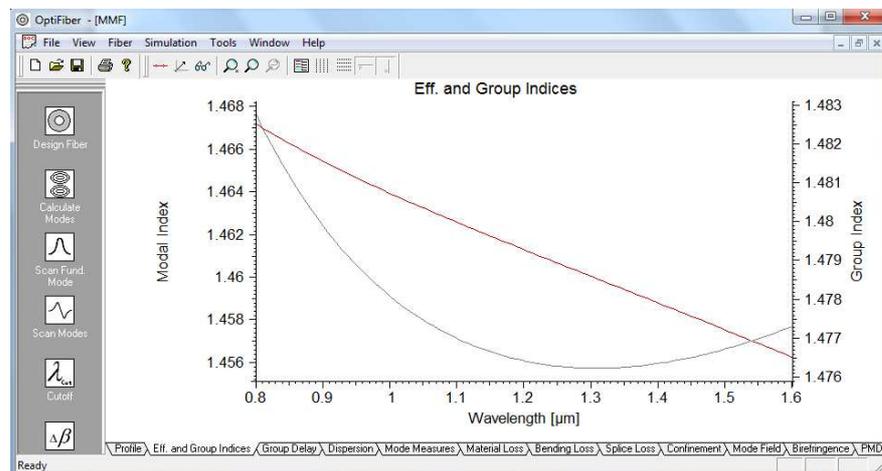


Fig. 5.3: Variación del índice modal y del índice de grupo con la longitud de onda, para la fibra multimodo G.651

5.3 Dispersión cromática

La dispersión cromática es la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz, y tiene que ver con la dispersión del material y la dispersión de la guía de onda. En la figura 5.4 se puede apreciar que la dispersión total es igual a la dispersión del material, y esta dispersión es igual a 0 ps/km.nm para una longitud de onda de 1307.3nm.

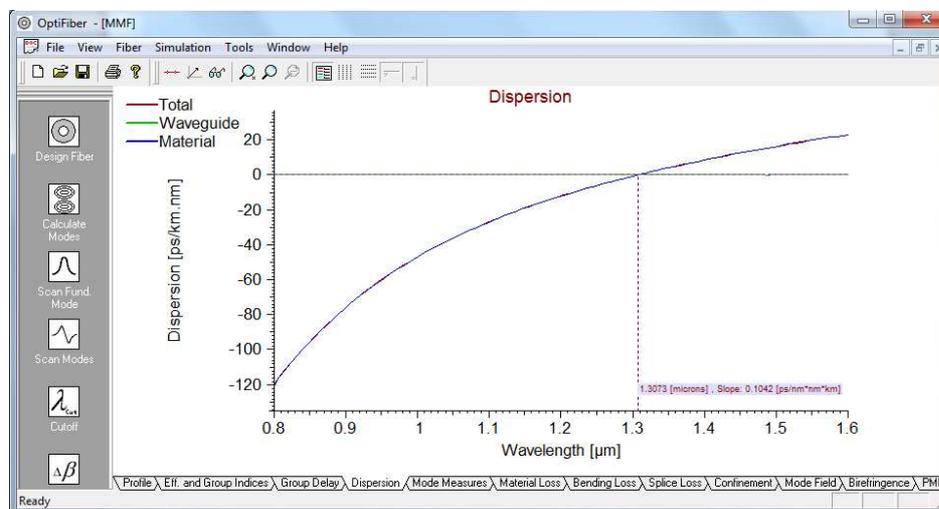


Fig. 5.4: Dispersión cromática para la fibra multimodo G.651.

5.4 Pérdidas del material

Para esta y otras fibras ópticas las pérdidas del material serán las mismas que se obtuvieron en el diseño anterior, debido a que éste es un elemento que se mantiene constante en las fibras, independientemente del tipo que sea (multimodo o monomodo); por lo tanto no será observado.

5.5 Pérdidas por curvaturas

En la figura 5.5 se observan las pérdidas por curvaturas en la fibra multimodo G.651. Como podemos apreciar, la pérdida por macro curvatura para esta fibra es igual a 0.

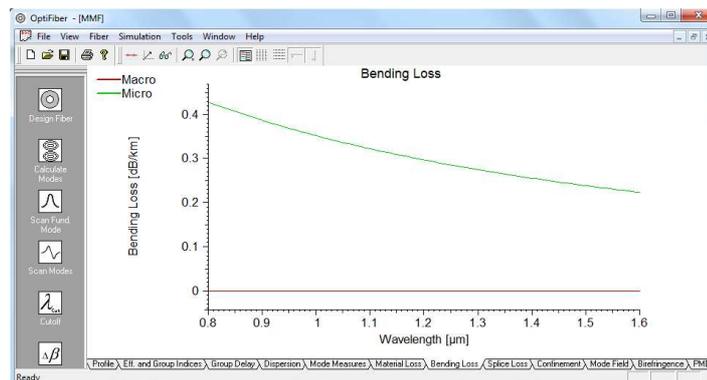


Fig. 5.5: Pérdidas por curvaturas en la fibra multimodo G.651.

5.6 Pérdidas por empalme

La figura 5.6 presenta la variación de las pérdidas por empalmes en la fibra multimodo G.651, con la longitud de onda.

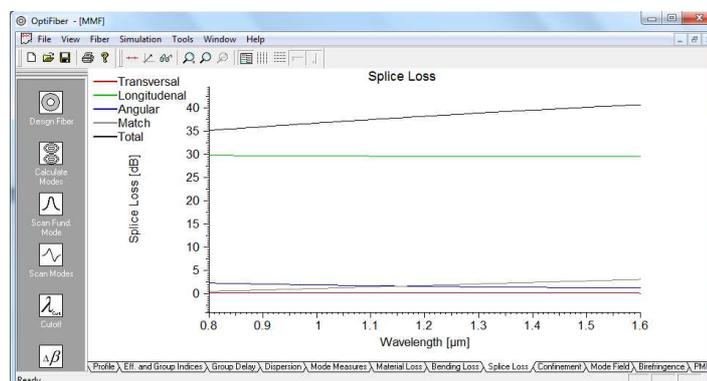


Fig. 5.6: Pérdidas por empalmes en la fibra multimodo G. 651.

5.7 Confinamiento de la fibra

En la figura 5.7 se puede observar el confinamiento de una fibra multimodo G.651, donde se pueden propagar más de un modo por el núcleo de esta fibra.

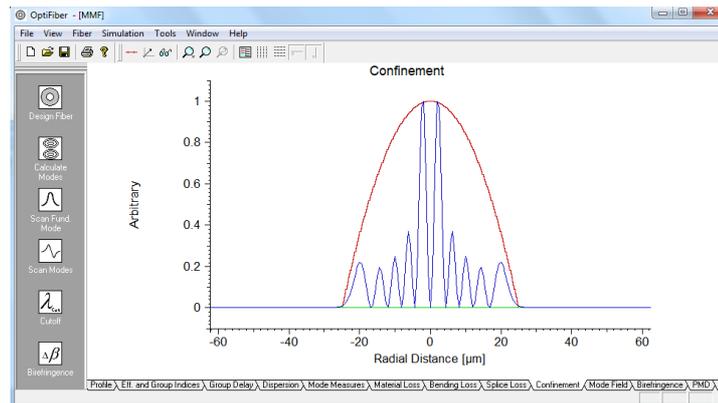


Fig. 5.7: Confinamiento de la fibra multimodo G.651.

5.8 Campo Modal

En la figura 5.8 se aprecia la intensidad del campo modal y en el centro se observa la mayor intensidad del campo.

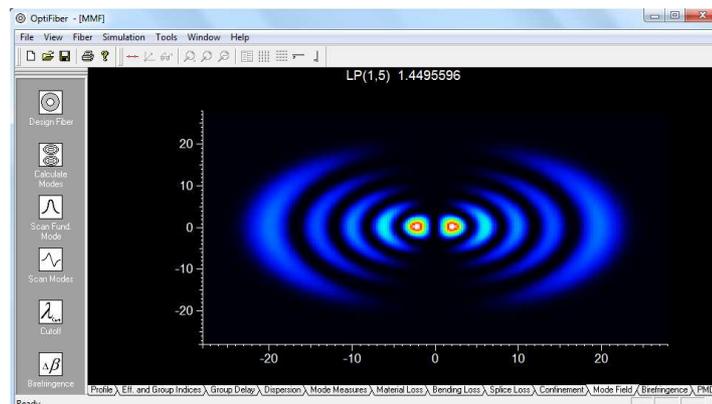


Fig. 5.8: Modo de propagación LP (1,5) para la fibra multimodo G.651.

CONCLUSIONES

Las herramientas del software OptiFiber sirvieron de gran ayuda para el diseño y simulación de fibras ópticas, con características conformes a la recomendación G.652 y G.651; también permitió hallar el perfil de índice de refracción de la fibra, la dispersión, la atenuación, la propagación de los modos, la birrefringencia, la PMD, etc.

El software OptiFiber, a más de ser una herramienta poderosa, es muy útil tanto a nivel profesional como a nivel educativo. Es eficaz al momento de entregar resultados, ya que lo hace de una manera rápida y sencilla.

Si se quiere obtener buenos resultados al diseñar y simular diferentes tipos de fibras ópticas, se debe tener conocimiento sobre las principales características de la fibra óptica, que se encuentran en las recomendaciones de la UIT.

RECOMENDACIONES

1. Expandir más la información acerca de la existencia de este software, ya que hay muchas personas que aún no lo conocen.
2. Fomentar el aprendizaje del software OptiFiber a los futuros ingenieros en redes y telecomunicaciones, con la finalidad de mejorar los conocimientos teóricos, adquiridos en el aula de clases.

BIBLIOGRAFÍA

Asimtelec Cía. Ltda. (17 de Marzo de 2013). *Acerca de Asimtelec Cía. Ltda.*

Obtenido de <http://serviciosdetelecomunicaciones.com/que-es-una-central-telefonica/>

Carrasco, A. (8 de Junio de 2014). Obtenido de sitio web de INAOE:

<http://ccc.inaoep.mx/~ariel/pIIs4.pdf>

CNT. (8 de Agosto de 2013). Obtenido de sitio web de CNT:

<https://www.cnt.gob.ec/index.php/sobre-la-cnt>

Dutari, R. E. (2012). Obtenido de sitio web de Raúl Enrique Dutari Dutari:

http://radutari.vacau.com/_archivos_pdf/monografias/fibra_optica_origen,_estructura_y_funcionamiento.pdf

El Telégrafo. (28 de Noviembre de 2013). Obtenido de sitio web de El Telégrafo:

<http://www.telegrafo.com.ec/noticias/informacion-general/item/ecuador-exportara-fibra-optica-en-2014.html>

Fluke Networks. (13 de Marzo de 2012). Obtenido de sitio web de Fluke

Networks: <http://es.flukenetworks.com/content/fluke-networks-new-optifiber-pro-otdr-redefines-enterprise-fiber-testing>

Gycom. (2013). Obtenido de sitio web de Gycom:

<http://www.fibraoptica.com/informacion-tecnica/vistazo-tecnologia>

Gycom. (28 de 07 de 2013). *Especialistas en fibra óptica*. Obtenido de <http://www.fibraoptica.com/informacion-tecnica/vistazo-tecnologia>

Intelyde. (8 de Julio de 2014). Obtenido de sitio web de Ingeniería de telecomunicaciones y desarrollo: http://intelyde.es/sites/default/files/paginas/fibra-optica-multimodo-monomodo_0.gif

Ledezma Milanez, A. (Junio de 2014). Obtenido de sitio web de Sistemas en comunicaciones: <http://sistemasencomunicaciones.blogspot.com/>

Leiva L., A., Tarifeño G., M., & Olivares V., R. (17 de Octubre de 2007). Obtenido de sitio web de redalyc.org: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77215314>

Martínez Contreras, E. J. (Julio de 2009). Obtenido de sitio web de Universidad de Oriente: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/1872/1/TESIS.IE009M51.pdf>

Oñate, I. (3 de Octubre de 2011). Obtenido de sitio web de fiberopticalhoy.com: <http://www.fiberopticalhoy.com/inspeccion-y-limpieza-de-conectores-opticos/>

Optiwave. (s.f.). Obtenido de Sitio web de Optiwave: <http://optiwave.com/category/products/component-design/optifiber/>

Ruíz Gutiérrez, Z. E. (Diciembre de 2012). Obtenido de sitio web del Repositorio electrónico del instituto politécnico nacional:
<http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/bitstream/handle/123456789/13016/Tesis%20Zeus%20Efra%C3%ADn%20Ruiz%20Guti%C3%A9rez..pdf?sequence=1>

Tecnoficios. (Junio de 2014). Obtenido de sitio web de tecnoficios:
http://www.tecnoficio.com/optica/fibra_optica_conceptos.php?psps_page=5

Tentori, D., Ayala Díaz, C., & Treviño Martínez, F. (22 de Octubre de 2008). Obtenido de sitio web del CENAM:
http://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/M2/SM2008-M222-1115.pdf

UIT. (Julio de 2014). Obtenido de sitio web de la UIT-T: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/es>

UM. (2 de Junio de 2014). Obtenido de sitio web de la Universidad de Mendoza de Argentina:
<http://www.um.edu.ar/catedras/claroline/backends/download.php?url=L0P hbGN1bG9fZGVfZW5sYWNlX2RlX0YuTy4vdGVvcu1hX2RlX0ZPLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=IT008>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

BER: Bit Error Rate (Tasa de bit errónea).

DGD: Differential Group Delay (Retardo diferencial de grupo).

IR: Absorción Infrarroja.

LD: Light Diode (Diodo de Luz).

LED: Light Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz).

LP: Linear Polarization (Polarización Lineal).

MFD: Modal Field Diameter (Diámetro del Campo Modal).

OH: Pérdidas por absorción de iones hidroxilo.

PMD: Dispersión por Modo de Polarización.

RS: Dispersión de Rayleigh.

SMF: Single Mode Fiber (Fibra óptica monomodo sencilla).

UIT: International Telecommunications Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

UIT-T: Sector de normalización de las telecomunicaciones.

UV: Ultravioleta.

ANEXOS

Atributos de la Fibra G. 652.A

Atributo	Dato	Valor
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8,6-9,5 μm
	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,6 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	1,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1550 nm	0,1 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{mín}}$	1300 nm
	$\lambda_{0\text{máx}}$	1324 nm
	$S_{0\text{máx}}$	0,092 ps/nm ² × km
Atributos del cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1310 nm	0,5 dB/km
	Máximo a 1550 nm	0,4 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PDM _Q máximo	0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTA – De conformidad con 6.2, se especifica un valor máximo del parámetro PMD _Q para la fibra no cableada, con el fin de soportar el requisito primario impuesto al cable PMD _Q .		

Atributos de la Fibra G. 652.B

Atributo	Dato	Valor
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8,6-9,5 μm
	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,6 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	1,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260 nm
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1625 nm	0,1 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{min}}$	1300 nm
	$\lambda_{0\text{máx}}$	1324 nm
	$S_{0\text{máx}}$	0,092 ps/nm ² × km
Atributos del cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1310 nm	0,4 dB/km
	Máximo a 1550 nm	0,35 dB/km
	Máximo a 1625 nm	0,4 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PMD _Q máximo	0,20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
NOTA – De conformidad con 6.2, se especifica un valor máximo del parámetro PMD _Q para la fibra no cableada, con el fin de soportar el requisito primario impuesto al cable PMD _Q .		

Atributos de la Fibra G. 652.C

Atributo	Dato	Valor
Diámetro del campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8,6-9,5 μm
	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,6 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	1,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260 nm
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1625 nm	0,1 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	λ_{0min}	1300 nm
	$\lambda_{\text{0máx}}$	1324 nm
	$S_{\text{0máx}}$	0,092 ps/nm ² × km
Atributos del cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo de 1310 nm a 1625 nm (Nota 2)	0,4 dB/km
	Máximo de 1383 nm \pm 3 nm	(Nota 3)
	Máximo a 1550 nm	0,3 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PMD ₀ máximo	0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
<p>NOTA 1 – De conformidad con 6.2, se especifica un valor máximo del parámetro PMD₀ para la fibra no cableada, con el fin de soportar el requisito primario impuesto al cable PMD₀.</p> <p>NOTA 2 – Esta región de longitud de onda puede ampliarse hasta 1260 nm añadiendo 0,07 dB/km de pérdida por dispersión de Rayleigh inducida al valor de atenuación a 1310 nm. En este caso, la longitud de onda de corte del cable no deberá sobrepasar 1250 nm.</p> <p>NOTA 3 – La atenuación media detectada en muestras a esta longitud de onda debe ser menor o igual al valor especificado para el intervalo 1310 nm a 1625 nm, después del proceso de envejecimiento del hidrógeno conforme a CEI 60793-2-50 en relación con la categoría de fibra B1.3.</p>		

Atributos de la Fibra G. 652.D

Atributo	Dato	Valor
Diámetro del campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8,6-9,5 μm
	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,6 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	1,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260 nm
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1625 nm	0,1 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{mín}}$	1300 nm
	$\lambda_{0\text{máx}}$	1324 nm
	$S_{0\text{máx}}$	0,092 ps/nm ² × km
Atributos del cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo de 1310 nm a 1625 nm (Nota 2)	0,4 dB/km
	Máximo de 1383 nm \pm 3 nm	(Nota 3)
	Máximo a 1550 nm	0,3 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PMD _Q máximo	0,20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
<p>NOTA 1 – De conformidad con 6.2, se especifica un valor máximo del parámetro PMD_Q en la fibra no cableada para soportar el requisito primario de PMD_Q del cable.</p> <p>NOTA 2 – Esta región de longitud de onda puede ampliarse hasta 1260 nm añadiendo 0,07 dB/km de pérdida por dispersión de Rayleigh inducida al valor de atenuación a 1310 nm. En este caso, la longitud de onda de corte del cable no deberá sobrepasar 1250 nm.</p> <p>NOTA 3 – La atenuación media detectada en muestras a esta longitud de onda debe ser menor o igual al valor especificado para el intervalo 1310 nm a 1625 nm después del proceso de envejecimiento del hidrógeno conforme a CEI 60793-2-50 en relación con la categoría de fibra B1.3.</p>		

Valor representativo de enlaces de fibra óptica concatenados (G. 652)

Coefficiente de atenuación	Región de longitud de onda	Valor típico del enlace
(Nota)	1260 nm – 1360 nm	0,5 dB/km
	1530 nm – 1565 nm	0,275 dB/km
	1565 nm – 1625 nm	0,35 dB/km
Coefficiente de dispersión cromática	D ₁₅₅₀	17 ps/nm × km
	S ₁₅₅₀	0,056 ps/nm ² × km
NOTA – El valor típico del enlace corresponde al coeficiente de atenuación del enlace utilizado en las Recs. UIT-T G.957 y G.691.		

Retardo diferencial de grupo (G. 652)

PMDQ máximo (ps/√km)	Longitud del enlace (km)	DGD máximo implícito inducido por la fibra (ps)	Velocidad binaria del canal
Sin especificar			Hasta 2,5 Gbit/s
0,5	400	25,0	10 Gbit/s
	40	19,0 (nota)	10 Gbit/s
	2	7,5	40 Gbit/s
0,20	3000	19,0	10 Gbit/s
	80	7,0	40 Gbit/s
0,10	> 4000	12,0	10 Gbit/s
	400	5,0	40 Gbit/s
NOTA – Este valor se aplica igualmente para los sistemas 10 Gigabit Ethernet.			

Atributos de la Fibra G. 651

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 2 \mu\text{m}$
Core diameter	Nominal	50 μm
	Tolerance	$\pm 3 \mu\text{m}$
Core-cladding concentricity error	Maximum	3 μm
Core non-circularity	Maximum	6%
Cladding non-circularity	Maximum	2%
Numerical aperture	Nominal	0.20
	Tolerance	± 0.015
Macrobend loss (Notes 1 and 2)	Radius	15 mm
	Number of turns	2
	Maximum at 850 nm	1 dB
	Maximum at 1300 nm	1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Modal bandwidth-length product for overfilled launch	Minimum at 850 nm	500 MHz · km
	Minimum at 1300 nm	500 MHz · km
Chromatic dispersion coefficient (Note 3)	λ_{min}	1295 nm
	λ_{max}	1340 nm
	S_{max} for $1295 \leq \lambda_0 \leq 1310 \text{ nm}$	≤ 0.105 $\text{ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$
	S_{max} for $1310 \leq \lambda_0 \leq 1340 \text{ nm}$	$\leq 375 \times (1590 - \lambda_0) \times 10^{-6} \text{ ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum at 850 nm	3.5 dB/km
	Maximum at 1300 nm	1.0 dB/km
NOTE 1 – In case of use of the multimode fibre outside the scope of this Recommendation, other macrobending loss values may be valid as specified in [IEC 60793-2-10].		
NOTE 2 – For testing the macrobending loss value, the launching conditions as specified for the attenuation measurement in [IEC 61280-4-1] shall be used.		
NOTE 3 – The worst-case chromatic dispersion coefficient at 850 nm (e.g., $S_0 = 0.09375 \text{ ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ at $\lambda_0 = 1340 \text{ nm}$ or $S_0 = 0.10125 \text{ ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ at $\lambda_0 = 1320 \text{ nm}$) is $-104 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$.		

Resultado de la simulación

Parámetro Característico	Valor Calculado	Valor típico (UIT-T)
Longitud de onda de dispersión cero, λ_0	1.309 μm	$1,3 \mu\text{m} < \lambda_0 < 1,324 \mu\text{m}$
Zero pendiente de dispersión, S0	0,0856 ps / (nm ² * km)	< 0,092 ps / (nm ² * km)
Ef. MFD en 1310	8.9 μm	8,6 - 9,5 μm ($\pm 0,6 \mu\text{m}$)
Ef. MFD en 1550	9.9 μm	$10.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$
Longitud de onda de corte LP11	1,23 μm	< 1,260 μm
PMD	0,22	PMD _{máx} 0,5