

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

FIBRA ÓPTICA MONO-MODO CON PERFIL DE ÍNDICE GRADUAL E INSENSIBLE A LAS CURVATURAS PARA REDES FTTH EN INTERIORES

Jesús Alonso Higuera Higuera

Ingeniería de Telecomunicaciones

Nelson Dario Gomez Cardona

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Octubre de 2015

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

La creciente necesidad de transmisión de gran cantidad de datos a altas velocidades ha llevado al uso de la fibra óptica como medio de transmisión en instalaciones residenciales. Lo anterior ha propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías en fibras ópticas fabricadas con nuevos materiales y con propiedades ópticas que ayuden a mejorar el desempeño en instalaciones de interiores donde uno de los principales problemas es la disminución en potencia óptica causado por las curvaturas. Este trabajo de grado pretende comparar el comportamiento de una fibra óptica estándar con el de una fibra óptica mono-modo de índice gradual asistida por canales, insensible a las curvaturas. Para el desarrollo de este trabajo, se partió del estudio de los diferentes perfiles de índice de refracción usados en fibras ópticas mono-modo insensibles a las curvaturas, así como los modelos matemáticos analíticos propuestos para estimar las pérdidas por curvatura; a partir de esta información se realizaron simulaciones de las fibras ópticas en un software comercial. Posteriormente se comparó el comportamiento teórico de dos fibras ópticas insensibles a las curvaturas y la fibra óptica mono-modo estándar. Se encontró que las fibras ópticas con perfil de índice gradual en el núcleo tienen un mejor confinamiento de la luz, y por lo tanto tiene menores pérdidas por curvatura.

Palabras clave: Transmisión de datos, fibra óptica insensible a la curvatura, instalaciones residenciales, potencia óptica, índice de refracción, simulaciones, pérdidas por curvatura, confinamiento de la luz.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO	9
I. CONCEPTOS FUNDAMENTALES: PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN FIBRA OPTICA.....	9
a) REFLEXIÓN INTERNA TOTAL.....	10
b) CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	12
c) TIPOS DE FIBRA ÓPTICA:	18
II. MODELADO DE FIBRAS ÓPTICAS INSENSIBLES A LAS CURVATURAS	24
3. METODOLOGÍA	27
I. COMSOL Multiphysics™	27
II. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	28
III. PROCESO DE MODELADO Y SIMULACIÓN	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
I. COMPARATIVO ENTRE FIBRAS ÓPTICAS SIMULADAS.....	43
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	55
REFERENCIAS.....	57

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 Fibra de Vidrio	9
Figura 2 Espectro Electromagnético	10
Figura 3 Reflexión óptica	11
Figura 4 Refracción de la luz.....	11
Figura 5 Cono de aceptación	13
Figura 6 Atenuación de Fibra Óptica.....	15
Figura 7 Diámetro de campo modal.....	16
Figura 8 Fibra Óptica Multimodo de índice Escalonado	21
Figura 9 Fibra Óptica Multimodo de índice Gradual	23
Figura 10 Fibra óptica equivalente.....	25
Figura 11 Índices de Refracción equivalentes	26
Figura 12 Esquema Geométrico de Modelo	36
Figura 13 Mallado de Fibra Óptica	41
Figura 14 Mallado de PML.....	41
Figura 15 Areas Efectivas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual	43
Figura 16 Factor de Confinamiento, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual	45
Figura 17 Índice Refractivo de Fibras Ópticas Simuladas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual	46
Figura 18 Índice Refractivo de Fibras Ópticas Simuladas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual	48
Figura 19 Índice Refractivo de Fibras Ópticas Simuladas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual	49
Figura 20 Modo de Índice Efectivo, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual	50
Figura 21 Factor de Confinamiento para a) R 7.5 mm, b) 14.5 mm en tres tipos de Fibras Ópticas	51
Figura 22 Campo Eléctrico Normal (V/m) para λ 1310 nm, en a) R 7.5 mm, b) R 14.5 mm, para tres tipos de Fibras Ópticas	52
Figura 23 Pérdidas de Campo Eléctrico, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual	53

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de fibras y especificaciones - Monomodo	18
Tabla 2 Fibras de Vidrio insensibles a la curvatura – Monomodo	19
Tabla 3 Tipos de fibras y especificaciones – Multimodo de Índice Escalonado.....	22
Tabla 4 Tipos de fibras y especificaciones - Multimodo de Índice Gradual	23
Tabla 5 Parámetros Geométricos del Modelo	34
Tabla 6 Dimensionamiento de la PML.....	35
Tabla 7 Coeficientes de Sellmeier para el Vidrio Puro	37
Tabla 8 Cambio en índice de refracción para cada capa.....	37

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

El tipo y contenido de información requerido por los usuarios finales hace que cada vez sea necesario acercar hasta el hogar medios de transmisión capaces de proveer tasas de bits del orden de las decenas de MHz de forma segura y confiable. Una de las tendencias actuales es llevar fibra óptica hasta el hogar, FTTH por su sigla en inglés; de tal forma que se puedan usar todas las ventajas que este medio de transmisión ofrece como son inmunidad electromagnética, bajos niveles de atenuación, multiplexación en longitud de onda, dimensiones y precio. El principal problema es que al interior de los hogares la fibra óptica debe seguir trayectorias que no son rectas y en algunos casos las fibras son sometidas a curvaturas con radios del orden los milímetros, esto sin contar con micro-curvaturas. Para solucionar este inconveniente se han propuesto diferentes tipos de fibras mono-modo, como la descrita en la norma ITU-T G.657, y fibras ópticas multi-modo plásticas, las cuales por sus características ópticas confinan fuertemente la luz en el núcleo. Este trabajo explora nuevos diseños de fibras ópticas mono-modo, en las cuales el perfil de índice de refracción es gradual en el núcleo y es asistido por canales en el revestimiento, buscando un mejor acople del campo modal del modo fundamental con el de la fibra óptica estándar.

Para llevar la fibra óptica hasta el interior del hogar es necesario el uso de fibras ópticas que sean insensibles a las macro-curvaturas, es decir radios de curvaturas mucho mayores que el radio del núcleo de la fibra. Los valores comunes de los radios de macro-curvatura en instalaciones internas están en un rango aproximado entre los 5 hasta los 15 mm, cuando las fibras ópticas estándar son sometidas a estas condiciones pierden parte de la potencia que transportan generando problemas en el receptor, y en últimas pérdidas de información. Para superar este problema se ha propuesto el uso de fibras ópticas insensibles a las curvaturas, las cuales, en principio deben acoplar sus propiedades de transmisión de la luz a las de las fibras ópticas estándar y así evitar pérdidas adicionales. Las fibras ópticas mono-modo con perfil de índice de refracción asistido por canales emergen como unas de las posibles soluciones ya que además de ser insensibles a las curvaturas, también tienen propiedades de propagación similares a las de las fibras ópticas estándar, sin embargo, haciendo variaciones graduales al índice de refracción del núcleo y variaciones a los canales del revestimiento es posible hacer una mejor sintonización de las propiedades de propagación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Objetivos

General

Comparar el comportamiento de los parámetros ópticos de propagación en fibras ópticas mono modo insensibles a las curvaturas cuyo perfil de índice es gradual en el núcleo y asistido por canales en el revestimiento, con las propiedades de la fibra óptica mono-modo estándar.

Específicos

Establecer los diferentes modelos matemáticos usados para describir las variaciones graduales de índice de refracción en el núcleo de las fibras ópticas mono-modo.

Definir el número de canales y sus características ópticas y geométricas, a partir de las variaciones evanescentes del campo electromagnético en la región del revestimiento.

A partir de los resultados anteriores, proponer al menos dos tipos de fibra óptica insensibles a las curvaturas.

Establecer el comportamiento de la atenuación y del diámetro del campo modal de fibras ópticas insensibles propuestas cuando estas son sometidas a curvaturas.

Organización de la Tesis

Este trabajo de grado consta de tres partes fundamentales, las cuales se describen a continuación:

En el Marco *Teórico*, primero se realiza una breve descripción del fenómeno de transmisión de la luz por fibra óptica, posteriormente se describe los fenómenos físicos de reflexión y refracción, fundamentales en la transmisión de información por esta tecnología. Luego se aborda la caracterización de una fibra óptica y después de describe los modos de propagación. Finalmente se muestra el tratamiento matemático para

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

encontrar las propiedades de propagación de las fibras cuando estas son sometidas a curvaturas.

En el capítulo de *Metodología* se da una descripción del software utilizado en el proyecto, luego se especifica el Método de Elementos Finitos como el utilizado por el software para determinar las variables seleccionadas en la simulación. Enseguida, se expone el proceso utilizado para realizar los modelos y las simulaciones planteadas.

En *Resultados y Discusión* se presentan los resultados obtenidos por medio de gráficas comparativas entre las diferentes simulaciones efectuadas, se analizan y se realizan las observaciones pertinentes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

I. CONCEPTOS FUNDAMENTALES: PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN FIBRA OPTICA

A continuación se describe el funcionamiento interno de los cables de fibra óptica como medio de transmisión de datos.

La fibra óptica es utilizada para la transmisión de datos usando como medio la conducción de luz por su interior, esta manera de emitir información no es propensa a ningún tipo de interferencia electromagnética o electrostática debido a que por su interior se propaga luz y no impulsos eléctricos. Además la fibra óptica presenta niveles de atenuación realmente bajos que permiten transmitir la señal por varios kilómetros sin necesidad de regenerarla; se compone de tres partes: Núcleo, Revestimiento y Cubierta Primaria (Ver Figura 1 Fibra de Vidrio)

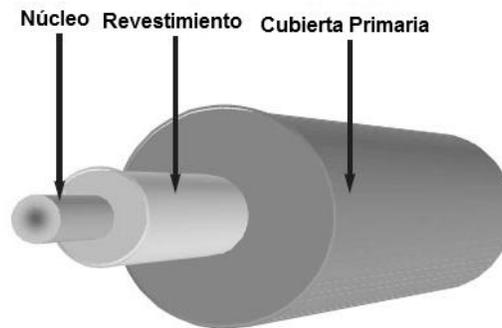


Figura 1 Fibra de Vidrio

Fuente: (Company, 1995)

Las transmisiones por fibra óptica utilizan las longitudes de onda infrarrojo, que de acuerdo con el “Espectro Electromagnético”, que agrupa todas las formas de radiaciones

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

existentes; son luces de alta longitud de onda pero baja energía que se encuentran entre 800nm a 1600nm, siendo los valores preferidos los de 850nm (Primera ventana), 1.310nm (Segunda Ventana), 1559nm (Tercera Ventana) que es donde se dan las de menores interferencias. Ver la Figura 2 Espectro Electromagnético.

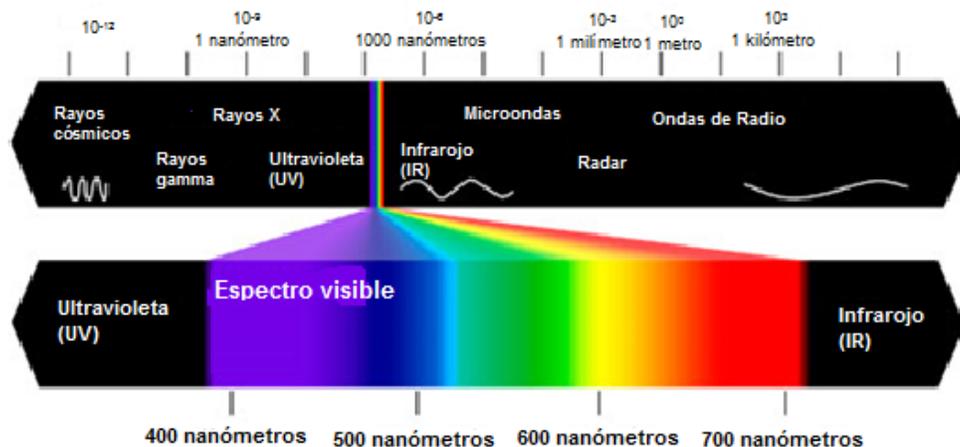


Figura 2 Espectro Electromagnético

a) REFLEXIÓN INTERNA TOTAL.

Las fibras ópticas se componen de un cilindro de material dieléctrico llamado núcleo, rodeado por un revestimiento también dieléctrico con un índice de refracción ligeramente inferior al núcleo. La forma de propagación de la señal se basa en las propiedades de refracción y reflexión de la luz debido a esta diferencia de valores en los índices de refracción, la luz introducida al interior de la fibra se mantiene y propaga a través del núcleo debido al efecto denominado “Reflexión Total Interna”

➤ **Reflexión de la Luz** (Elementos y Equipos Eléctricos, 2015)

Cuando un rayo luminoso incide sobre la superficie de separación de dos sustancias, una fracción de la misma se refleja y su proporción es función del ángulo que forma el rayo de

luz incidente con la perpendicular a la superficie de separación de los dos medios (α_1). Ver Figura 3 Reflexión óptica

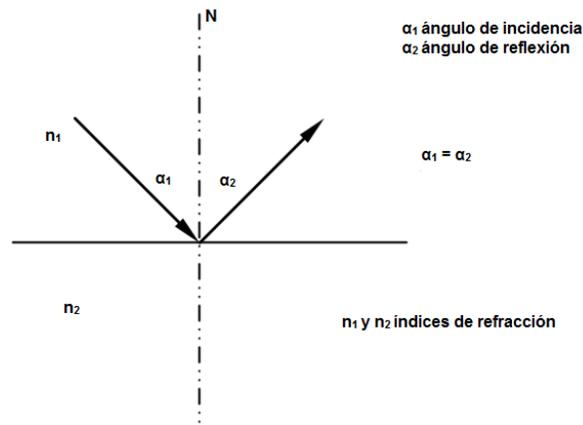


Figura 3 Reflexión óptica

➤ **Refracción de la Luz** (Elementos y Equipos Eléctricos, 2015)

Si un rayo luminoso incide con un ángulo (α) de modo oblicuo desde una sustancia menos densa a otra más densa, su dirección de propagación cambia y su trayectoria continúa en la segunda sustancia con un ángulo de refracción (β), diferente al de incidencia. Ver Figura 4 Refracción de la luz

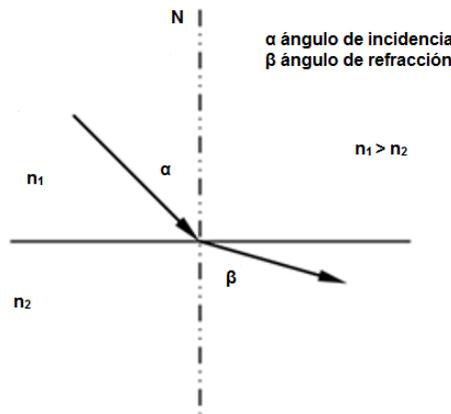


Figura 4 Refracción de la luz

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

➤ **Reflexión Total** (Elementos y Equipos Eléctricos, 2015)

Cuando el rayo luminoso incide con un ángulo cada vez mayor desde una sustancia con un índice de refracción n_1 sobre la superficie de separación, con una sustancia menos densa con índice de refracción n_2 , el ángulo de refracción β comienza a aumentar, y llega a tomar el valor de 90° para un determinado ángulo de incidencia. Para ese valor de ángulo de incidencia, el rayo refractado ya no viaja por la segunda sustancia sino que lo hace paralelo a la superficie de separación de las dos sustancias. El ángulo de incidencia que hace que ocurra este fenómeno se denomina ángulo límite de las dos sustancias o ángulo de acoplamiento, y todos aquellos rayos que incidan con un valor de ángulo α superior al ángulo límite, ya no se van a refractar por la segunda sustancia sino que se van a reflejar totalmente por la sustancia que venía viajando, a este fenómeno se lo conoce como reflexión total. (Ver Figura 5 Cono de aceptación)

La reflexión total puede ocurrir únicamente cuando un rayo luminoso incide desde una sustancia ópticamente más densa sobre otra ópticamente menos densa y nunca se da en el caso inverso. El ángulo límite es función de la relación de los índices de refracción de las dos sustancias.

b) CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

➤ **Cono de Aceptación** (DUTARI, 2012)

La luz puede entrar a la fibra óptica únicamente si el rayo se haya contenido dentro del denominado “Cono de Aceptación”, el cual está formado por el ángulo límite de las dos sustancias, para que se cumpla la reflexión total de la luz. El ángulo de apertura que ofrece el cono de aceptación está directamente asociado a los materiales con los cuales la fibra óptica ha sido construida. La siguiente Figura muestra la forma en que actúa el Cono de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Aceptación, para conducir los rayos de luz a través del núcleo de la fibra. Ver Figura 5
 Cono de aceptación

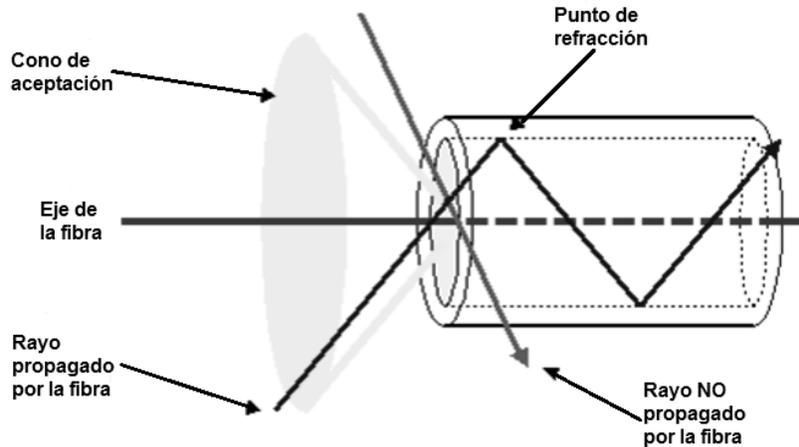


Figura 5 Cono de aceptación

Fuente: (Mera, 2015)

Todos los rayos luminosos que incidan con un ángulo menor que $(90^\circ - \theta_{max})$ con respecto al eje de la fibra óptica son conducidos en el núcleo, los demás son radiados fuera de este. θ_{max} es máximo ángulo de acoplamiento, el cual es función de los índices de refracción n_1 y n_2 , correspondientes al núcleo y el revestimiento respectivamente. (Ver Ecuación 1). Al seno del ángulo de acoplamiento se le llama apertura numérica (AN) del conductor de fibra óptica.

$$AN = \text{sen}(\theta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1)$$

Donde Δ es el cambio fraccional de índice de refracción, el cual se define como:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2)$$

Así mismo, se ha definido la frecuencia normalizada como:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} * AN \quad (3)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde:

α es el radio del núcleo de la fibra

λ es la longitud de onda de la luz que se acopla a la fibra óptica

Para $V < 2.405$, se cumple que la fibra óptica es monomodo

➤ **Atenuación**

La atenuación es el principal fenómeno lineal, causante de la pérdida de potencia óptica. El coeficiente de atenuación se define como la pérdida de potencia en la fibra por unidad de longitud (en dB/km). La atenuación de la fibra varía considerablemente según la longitud de onda de la luz. La atenuación es el resultado de dos factores: absorción y “scattering” (dispersión), la primera ocurre porque las moléculas presentes en el vidrio absorben la luz y la convierten en calor. La principal fuente de absorción son los residuos de iones de hidróxilo (OH⁺) y los dopantes que se utilizan para modificar el índice de refracción del vidrio. Esta absorción ocurre en longitudes de onda independientes, determinadas por los elementos que absorben la luz. La absorción de OH⁺ predomina y ocurre más notoriamente en 1000nm, 1400nm y por encima de 1600nm. La mayor causa de la atenuación es el “scattering” que ocurre cuando la luz choca con átomos individuales en el vidrio. La luz que se dispersa espacialmente haciendo ángulos mayores al de la apertura numérica de la fibra y se absorbe en el revestimiento o se refleja hacia la fuente. La dispersión también es una función de la longitud de onda, inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz elevada a la cuarta potencia. Por lo tanto, si se duplica la longitud de onda de la luz, las pérdidas por dispersión se reducen a la mitad en relación a la cuarta potencia o a la dieciseisava parte. La absorción y el scattering en conjunto producen una curva de atenuación de una fibra estándar de vidrio, tal como se ve en la Figura 6 Atenuación de Fibra .

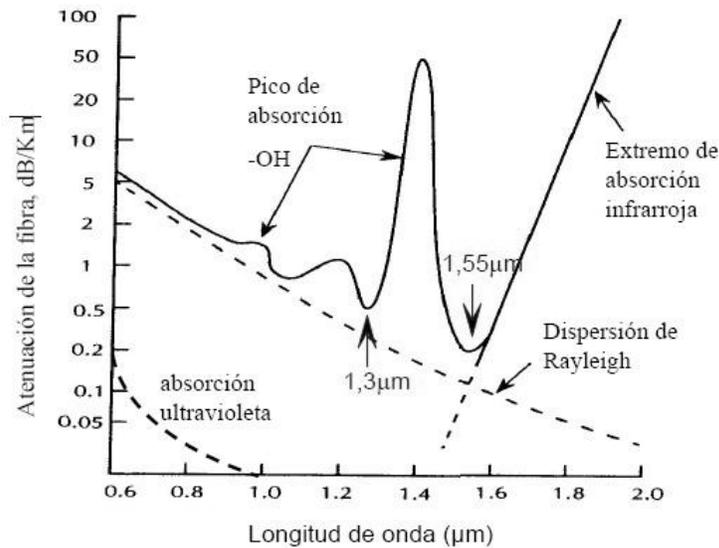


Figura 6 Atenuación de Fibra Óptica

Fuente: (Oficios Técnicos, 2015)

La capacidad de transmisión de información de la fibra multimodo está limitada por dos componentes de la dispersión: modal y cromática.

➤ **Dispersión**

El segundo factor que incide en el ancho de banda de la fibra es la dispersión cromática, la cual se produce por la superposición de dos fenómenos:

- Dispersión guía de onda: Debido a la pequeña estructura geométrica de la fibra, en particular de la dimensión del núcleo (10 a 50 μm) se produce en la práctica que la energía óptica se propaga no solo por el núcleo como debía esperarse, sino que una pequeña parte también lo hace por el recubrimiento. Este efecto es más notable en la fibra monomodo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Dispersión del material:** Debido a que el índice de refracción del núcleo es función de la longitud de onda, y que la luz viaja por la fibra no es monocromática, se produce el efecto de cada componente de la luz que viaja a diferentes velocidades, causando ensanchamiento temporal de los pulsos de luz, debido a los retardos de cada una de las componentes espectrales.

En las fibras ópticas multimodo, tiene lugar la dispersión modal, la cual genera también ensanchamientos temporales de los pulsos de luz. Este ensanchamiento se produce debido a que los rayos que se propagan dentro de la fibra, recorren diferentes caminos y en consecuencia llegan a distinto tiempo al final de la fibra. Debido a que los modos de orden superior tienen desviaciones mayores, la dispersión modal de una fibra (y en consecuencia su ancho de banda de láser) tiende a ser muy sensible a las condiciones modales en la fibra.

➤ **Radio del campo modal**

El radio del campo modal w es la distancia medida desde cuando la intensidad del campo eléctrico a caído a $1/e$, donde e es la base de los logaritmos naturales (ver Figura 7 Diámetro de campo modal).

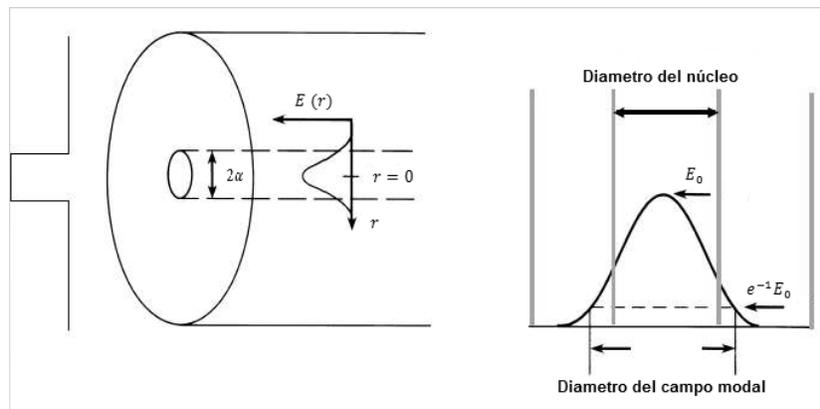


Figura 7 Diámetro de campo modal

Fuente: (Bizkaia, 2015)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A partir del radio del campo modal se define el diámetro del campo modal $MDF = 2w$, siendo este el alcance de la intensidad del campo eléctrico en la sección transversal de la fibra óptica.

La potencia óptica que viaja en la fibra óptica no está contenida en toda en el núcleo, pues una parte de ésta viaja en el campo evanescente que está en el revestimiento, debido a esto se definen otros parámetros que permiten determinar cómo se distribuye la potencia óptica en el área transversal de la fibra óptica.

➤ **Área efectiva y Factor de Confinamiento**

Matemáticamente el área efectiva (A_{ef}) se define como el área sobre la cual se distribuye la potencia total de la luz que viaja por la fibra óptica, donde se cumple lo siguiente:

$$A_{ef} = \frac{2\pi \left(\int_0^\infty |E_a(r)|^2 r dr \right)^2}{\int_0^\infty |E_a(r)|^4 r dr} \quad (4)$$

La fracción de potencia que viaja por el núcleo se le llama factor de confinamiento (Γ), definido como:

$$\Gamma = \frac{\int_0^a |E_a(r)|^2 r dr}{\int_0^a |E_a(r)|^2 r dr} \quad (5)$$

Para una fibra óptica monomodo se cumple que:

$$\text{Radio de campo modal: } \frac{w}{a} = 0,65 + 1,619V^{-3/2} + 2,879V^{-6} \quad (6)$$

$$\text{Área efectiva: } A_{ef} \approx \pi w^2 \quad (7)$$

$$\text{Factor de confinamiento: } \Gamma \approx 1 - \exp\left(\frac{-2a^2}{w^2}\right) \quad (8)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

c) TIPOS DE FIBRA ÓPTICA:

Dependiendo del tipo de propagación de la señal luminosa en el interior de la fibra, éstas se clasifican en los siguientes grupos:

➤ **Monomodo estándar**

Se le da el nombre de "monomodo" (DUTARI, 2012) porque existe un solo rayo de luz, que en una primera aproximación, es transmitido siguiendo la trayectoria del eje de la fibra (modo de propagación único). Las elevadas tasas de transmisión alcanzando grandes distancias constituyen la principal ventaja de este tipo de fibras. Sin embargo en sistemas interiores, basados en *fibras ópticas para el hogar* (FTTH), aplicación que está en crecimiento y utiliza para sus transmisiones la banda C, la fibra monomodo estándar es sensible a la curvatura. Dada la tendencia de reducir los espacios de las cabinas de instalación en interiores, la fibra óptica estándar debe ser reemplazada por fibras ópticas en las cuales la luz no sufra fuertes atenuaciones causadas por las pequeñas curvaturas a las cuales es sometida la fibra.

Tabla 1 Tipos de fibras y especificaciones - Monomodo

Núcleo/Revestimiento	Atenuación 1310/1550 nm	Ancho de Banda 1310/1550 nm	Aplicaciones/Notas
9/125 micrones (OS1, B1.1, o G.652)	0.4/0.25 dB/km	~100 Terahertz	Fibra estándar monomodo, telecomunicaciones /TV por cable, redes LAN de larga distancia y alta velocidad
9/125 micrones (OS2, B1.3, o G.652)	0.4/0.25 dB/km	~100 Terahertz	Fibra de "pico de agua reducido" (LWP)
9/125 micrones (B2, o G.653)	0.4/0.25 dB/km	~100 Terahertz	Fibra con dispersión desplazada (DSF)
9/125 micrones (B1.2, o G.654)	0.4/0.25 dB/km	~100 Terahertz	Fibra con corte desplazado (CSF)
9/125 micrones (B4, o G.654)	0.4/0.25 dB/km	~100 Terahertz	Fibra con dispersión desplazada no nula (NZ-DSF)
10/125 micrones			
Nomenclatura B* según la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), nomenclatura G* según la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones).			

Fuente: (The Fiber Optic Association, Inc.)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

➤ *Monomodo insensibles a las curvaturas*

Tabla 2 Fibras de Vidrio insensibles a la curvatura – Monomodo

Atributo	G. 657A					G. 657B					
Diámetro Campo Modal 1310nm • Rango Nominal • Tolerancia	• 8,6 – 9,6 μm • $\pm 0,4 \mu\text{m}$					• 8,6 – 9,6 μm • $\pm 0,4 \mu\text{m}$					
Diámetro de recubrimiento	• Nominal = 125 μm • Tolerancia = $\pm 0,7 \mu\text{m}$					• Nominal = 125 μm • Tolerancia = $\pm 0,7 \mu\text{m}$					
Pérdidas en Macro-Curvaturas	G. 657. A1		G. 657. A2			G. 657. B2			G. 657. B3		
• Radio (mm)	15	10	15	10	7,5	15	10	7,5	10	7,5	5
• Número de curvas	10	1	10	1	1	10	1	1	1	1	1
• Max. a 1550 nm (dB)	0,25	0,75	0,03	0,1	0,5	0,03	0,1	0,5	0,03	0,08	0,15
• Max. a 1625 nm (dB)	1,0	1,5	0,1	0,2	1,0	0,1	0,2	1,0	0,1	0,25	0,45
Características de transmisión • Atenuación 1310/1550 nm • PMD	• 0,4/0,30 dB/Km • 20 cables					• 0,4/0,30 dB/Km • 20 cables					

Fuente: (T, 2012)

Las fibras ópticas monomodo insensibles a la curvatura están siendo un soporte para las aplicaciones de fibras ópticas para el hogar (FTTH), con el objetivo de superar los problemas de atenuación en las pequeñas curvaturas, las cuales son muy comunes en aplicaciones FTTH, donde se dan instalaciones con curvaturas hasta de 5mm. El estándar ITU – T publica en diciembre de 2006 dos versiones de fibras ópticas monomodo insensibles a la curvatura que son G. 657A y G. 657B, son fibras optimizadas para disminuir las pérdidas de información en las macrocurvaturas, su diferencia radica en el radio de curvatura permisible para cada una de las categorías. Las fibras ópticas monomodo G.657A son compatibles con las fibras G. 652 en sus especificaciones dimensionales, propiedades de transmisión y de interconexión; por consiguientes son utilizadas en aplicaciones de redes de acceso, en longitudes de onda que comprende el rango 1260nm

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

a 1625nm. Las fibras del estándar G. 657B están diseñadas para radios de curvaturas inferiores a la categoría A, se utiliza para instalaciones de cortas distancias (inferiores a 1Km) y finalizaciones de redes de acceso, particularmente en interiores de edificios. Su uso comprende longitudes de onda en el rango 1260nm a 1625nm. Con respecto a las fibras G. 652, estas fibras presentan pequeñas diferencias en dispersión cromática y modo de dispersión de polarización, sin embargo es totalmente compatible con G. 657A.

➤ **Multimodo**

Esta fibra recibe el nombre de fibra "multimodo", (DUTARI, 2012) porque permite que el rayo de luz sea conducido por múltiples trayectorias. Sus principales características son:

- ✓ Núcleo mayor que el del cable monomodo
- ✓ Permite mayor dispersión, y por consiguiente, pérdida de señal
- ✓ Adecuado para aplicaciones de larga distancia, pero para menores distancias que el monomodo (hasta 2Km)
- ✓ Usa LED como fuente de luz en longitudes de onda de 850nm y 1300nm para redes de área local (LAN) más lentas; con fuentes láser a 850nm (VCSEL) y 1310nm (láser Fabry-Perroy) para redes que operan a velocidades de Gigabits por segundo o mayores.
- ✓ Comúnmente utilizado para redes LAN o para distancias de unos 200mts dentro de redes de campus

Dependiendo del ángulo de incidencia de los rayos dentro de la fibra, estos tomarán caminos diferentes y tardarán más o menos tiempo en llegar al destino, por lo que se produce dispersión de señal (rayos que salen al tiempo que un rayo tomado como referencia, y que pueden llegar antes o después del rayo de referencia), este fenómeno, conocido como dispersión modal, limita la velocidad de transmisión. Para este tipo de fibra, se cumple que la atenuación es mucho mayor en 850nm (llamada longitud de onda corta), de 3dB/km, mientras que en 1300nm (llamada longitud de onda larga) es de sólo 1dB/km; lo que significa que en 850nm, la mitad de la luz se pierde en 1km, mientras que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

en 1300nm sólo se pierde el 20%. En consecuencia, para transmisiones de larga distancia es recomendable utilizar la mayor longitud de onda posible para lograr una atenuación mínima y una distancia máxima entre los repetidores. Las fibras ópticas de tipo multimodo se clasifican en:

❖ *Multimodo de índice escalonado*

En estas fibras, el núcleo está constituido por un material uniforme cuyo índice de refracción es notoriamente superior al de la cubierta que lo rodea. El paso desde el núcleo hasta la cubierta conlleva por tanto una variación considerable del índice de refracción, de ahí su nombre de índice escalonado. Las fibras multimodo de índice escalonado están fabricadas a base de vidrio, con una atenuación de 3 dB/km, o plástico con una atenuación de 10 dB/km. Tienen un ancho de banda que llega hasta los 40 MHz/Km. En la figura 8 se muestra el comportamiento de la luz en este tipo de fibra. Estas fibras tienen mayor atenuación y debido a la dispersión causada por las diferentes distancias que recorren los modos a través del núcleo no son útiles para muchas aplicaciones. Las fibras de índice escalonado más comunes son fibras de plástico (POF) que generalmente tienen 1 mm de diámetro y se utiliza principalmente para transmisiones de audio y de televisión; además las fibras de sílice con revestimiento rígido o de plástico (PCS/HCS) 200 micrones

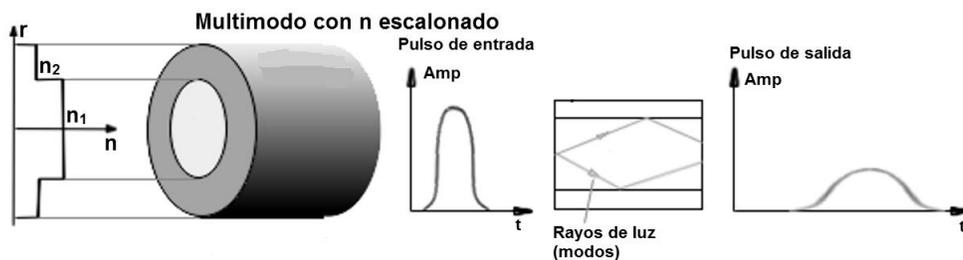


Figura 8 Fibra Óptica Multimodo de índice Escalonado

Fuente: (Fibras Ópticas, 2015)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 3 Tipos de fibras y especificaciones – Multimodo de Índice Escalonado

Núcleo/ Revestimiento	Atenuación 850 nm	Ancho de banda 850 nm	Aplicaciones/Notas
200/240 micrones	4-6 dB/km	50 MHz-km	<ul style="list-style-type: none"> - Núcleo de vidrio con revestimiento de plástico - Redes LAN y enlaces de baja velocidad

Fuente: (The Fiber Optic Association, Inc.)

❖ *Multimodo de índice gradual*

El principio de las fibras ópticas multimodo de índice gradual se basa en que el índice de refracción en el interior del núcleo no es único y decrece cuando se desplaza del eje del núcleo hacia la cubierta, lo que produce un efecto espiral en todo el rayo introducido en la fibra óptica, ya que la luz se desplaza describiendo una trayectoria helicoidal a medida que avanza por el cable. Estas fibras permiten reducir la dispersión entre los diferentes modos de propagación a través del núcleo de la fibra, ya que todos los modos sufren el mismo retardo debido a que la variación gradual del índice modera su velocidad de transmisión (la velocidad de propagación de la luz es inversamente proporcional al índice de refracción) de esta manera permite aumentar el ancho de banda que llega hasta los 500MHz/Km. La fibra multimodo de índice gradual se utiliza principalmente para redes en planta interna, de área local, de fibra hasta el escritorio, de CCTV y de otros sistemas de seguridad. La fibra multimodo de índice gradual de tamaño 62,5/125 nanómetros (diámetro del núcleo/diámetro de la cubierta) está normalizado, pero se pueden encontrar otros tipos de fibras, tales como: la multimodo de índice gradual 50/125 nanómetros y la multimodo de índice gradual 100/140 nanómetros. Sus costos son elevados por las características que presenta su núcleo.

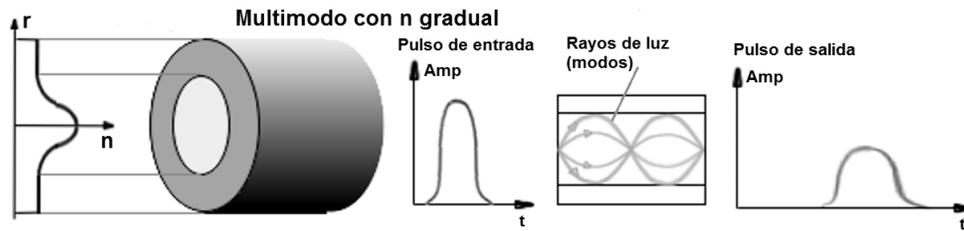


Figura 9 Fibra Óptica Multimodo de índice Gradual

Fuente: (Fibras Ópticas, 2015)

Tipos de fibra de Índice Gradual y especificaciones estándar

Tabla 4 Tipos de fibras y especificaciones - Multimodo de Índice Gradual

Núcleo/ Revestimiento	Atenuación 1310/1550 nm	Ancho de banda 1310/1550 nm	Aplicaciones/Notas
50/125 micrones (OM2)	3/1 dB/km	500/500 MHz-km	Para láser para redes LAN GbE Soporta hasta Gigabit Ethernet (1 Gbit/s) (Multimodo sobre LED)
50/125 micrones (OM3)	3/1 dB/km	2000/500 MHz-km	Optimizada para VCSEL de 850 nm Soporta hasta 10 Gigabit Ethernet (300 m) (Multimodo sobre LASER)
50/125 micrones (OM4)	3/1 dB/km	4700/500 MHz-km	Optimizada para VCSEL de 850 nm >10Gb/s
62.5/125 micrones (OM1)	3/1 dB/km	160-200/500 MHz-km	Fibra para red LAN (FDDI) Fibra estándar Soporta hasta Gigabit Ethernet (1 Gbit/s) (Multimodo sobre LED)
100/140 micrones	3/1 dB/km	150/300 MHz-km	Obsoleto

Según el sistema ISO 11801, Nomenclatura OM* según la TIA (Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones)

Fuente: (The Fiber Optic Association, Inc.)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

II. MODELADO DE FIBRAS ÓPTICAS INSENSIBLES A LAS CURVATURAS

Cuando las fibras ópticas son sometidas a curvaturas, como el caso de aquellas que se usan para instalaciones internas, la condición de reflexión total interna deja de cumplirse y por lo tanto parte de la luz es radiada fuera de esta aumentando fuertemente las pérdidas. Teóricamente, se tienen varios modelos para estimar el parámetro de atenuación debido las pérdidas. Estos modelos se pueden dividir en dos grupos, el primero está conformado por aquellos modelos basados en el modelo propuesto por Marcuse (Cole, 2007), ecuación 9, este modelo tiene como principio el comportamiento evanescente del campo electromagnético de cada modo en el revestimiento de la fibra óptica, cuando esta es curvada.

$$\frac{\Delta P}{P} = 2\alpha = \frac{2ak^2 \exp[2\gamma a] \exp\left[-\frac{2}{3} \frac{\gamma^3}{\beta^2} R\right]}{e_{\nu} \sqrt{\pi \gamma R} V^2} \quad (9)$$

Donde:

ΔP es la potencia radiada fuera de la fibra

P es la potencia total

β es la constante de propagación de cada modo

k es la tasa de la variación del campo en el núcleo

γ es la tasa de variación del campo en el revestimiento

R es el radio de curvatura

En el otro grupo de modelos están aquellos que utilizan transformaciones o mapeos para llevar la fibra óptica curvada a una fibra óptica recta equivalente, como se muestra en la Figura 10 Fibra óptica equivalente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

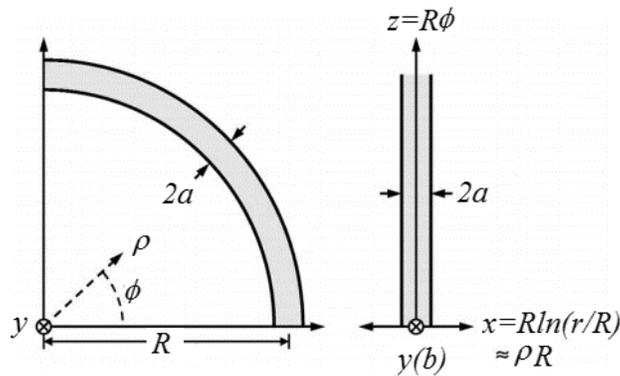


Figura 10 Fibra óptica equivalente

La fibra de vidrio curvada sufre cambios físicos en su composición debido a los esfuerzos de tracción y compresión a los cuales se ve sometido el material. Con esta transformación los índices de refracción del núcleo y el revestimiento toman los siguientes valores dependientes del radio de curvatura R ,

$$n'_1 = n_i \left(1 + x/R_{eff} \right), i = 1, 2 \quad (10)$$

R_{eff} conocido como radio efectivo tiene en cuenta los efectos elasto-ópticos y está definido como,

$$R_{eff} = \frac{R}{1 - \frac{n_i^2}{2} [P_{12} - \nu (P_{11} + P_{12})]} \quad (11)$$

Donde:

ν, P_{11}, P_{12} son la razón de Poisson, y las componentes del tensor elasto-óptico del vidrio puro, respectivamente. Para una fibra de vidrio puro, se puede aproximar con la siguiente expresión: $R_{eff} = R * 1,28$

En la Figura 11 Índices de Refracción equivalentes, se muestra el comportamiento del índice de refracción de la fibra de vidrio, a la derecha se observa el índice de refracción de una fibra de vidrio curvada, y a la izquierda se puede ver el índice de refracción equivalente después de la transformación a una fibra de vidrio lineal equivalente; además

se muestra la variación del índice efectivo modal para cada caso. La distribución mostrada es en un corte transversal de la fibra de vidrio.

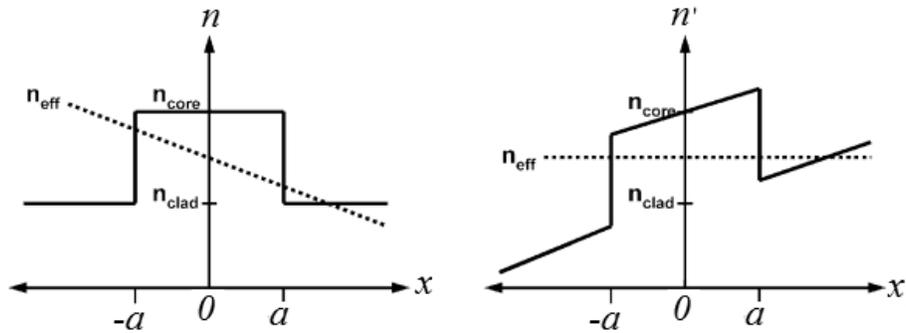


Figura 11 Índices de Refracción equivalentes

De acuerdo a la transformación utilizada, se puede percibir que el índice de refracción de la fibra de vidrio mapeada aumenta con la distancia desde el centro de la curvatura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología empleada en la simulación de modelos de propagación de la luz en fibras ópticas insensibles a la curvatura. En primer lugar se realiza una breve descripción del software utilizado para la definición del modelo y posteriores cálculos; luego se nombra de manera general el método matemático implementado por el software para arrojar la solución aproximada, y finalmente se describe el proceso que se llevó a cabo en este modelamiento específico.

I. COMSOL Multiphysics™

COMSOL Multiphysics™ (COMSOL, 2015) es un software para el modelado virtual de sistemas físicos basado en el Método de los Elementos Finitos MEF, es una herramienta de modelado, análisis y simulación de fenómenos multifísicos. El software está diseñado para modelar simultáneamente cualquier combinación de fenómenos físicos (fenómenos físicos acoplados), a partir de la integración de dos formas de simular, la primera es a partir de aplicaciones y solvers predefinidos en el software, y la segunda es introduciendo al programa las ecuaciones específicas que modelan el problema; COMSOL Multiphysics permite combinar las maneras de simular con el objetivo de tener un modelo más aproximado a la realidad.

COMSOL Multiphysics puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que un ingeniero o científico pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales (PDE), incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos – Multifísica

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Principales características del software son:

- Interfaz gráfica "amigable" e interactiva para todas las etapas del proceso de modelado.
- Formulación general para un modelado rápido y sencillo de sistemas arbitrarios de PDEs.
- Multifísica multidimensional para modelado simultáneo de sistemas en 1D, 2D y 3D.
- Incorpora herramientas CAD para modelado sólido en 1D, 2D y 3D.
- Permite importar y reparar la geometría de archivos CAD en formato DXF y IGES. En particular, permite la importación de archivos creados en AutoCAD y CATIA.
- Generación automática y adaptativa de mallas, con un control explícito e interactivo sobre su tamaño.
- Extensa biblioteca de modelos que documentan y muestran más de 80 ejemplos resueltos.
- Tiene disponibles los "solvers" más novedosos; entre ellos destacan, "solvers" iterativos para problemas estacionales lineales y no lineales, dependientes del tiempo, y de valores propios.
- Post-procesado interactivo que permite visualizar cualquier función de la solución.
- Integración total con MATLAB y sus tool-boxes.

II. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF), es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

MEF, en lugar de resolver el problema para todo el cuerpo en una sola operación, parte de la definición de ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, se formulan las ecuaciones para cada elemento finito y se combinan para obtener la solución de todo el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo). Es un método que no proporciona la solución “exacta” a un problema dado, sino que, en realidad posibilita obtener una solución aproximada que, con el juicio ingenieril puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico

Este método permite:

- Simular sistemas físicos y biológicos complejos, y de esta manera permite reducir las necesidades de experimentos con modelos y prototipos (caras y lentas).
- Diseñar y mejorar productos y aplicaciones industriales, ya que permite comparar fácilmente distintas alternativas de diseño para llegar al óptimo ingenieril.

Este método consiste en el proceso de modelado de un cuerpo dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí (elementos finitos) interconectados en puntos comunes a dos o más elementos (nodos). El conjunto de nodos considerando sus relaciones de interconexión se llama «malla» (pueden ser superficies, volúmenes y barras). De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema, la cual permitirá la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. De esa manera, una vez conocidos dichos desplazamientos, se podría determinar, de una forma

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

aproximada las tensiones y las deformaciones en el interior de cada elemento. Las soluciones nodales pueden referirse también a cambios de temperatura o presiones.

La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, resultando finalmente sólo una solución aproximada.

Típicamente el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

En la actualidad, el desarrollo de nuevas aplicaciones más potentes, versátiles y económicas, como por ejemplo el desarrollo de antenas de alta potencia y precisión, el uso de láseres en sistemas de telecomunicaciones ópticas, el desarrollo de nuevos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

materiales de mayor conductividad eléctrica, entre otras; han hecho que el diseño de aparatos y dispositivos tengan un cambio radical, generando que los fenómenos electromagnéticos ganen gran importancia en las simulaciones efectuadas por medio del MEF.

Las formulaciones para la solución de problemas en electromagnetismo computacional se pueden clasificar en dos grandes grupos, según el tipo de ecuación que resuelven:

1. Las basadas en potenciales escalares y/o vectoriales, estas formulaciones son ampliamente utilizadas en el cálculo numérico de campos electromagnéticos, específicamente en problemas estáticos, armónicos y especialmente en corrientes de Foucault. Se utiliza cuando es suficiente simular la dinámica mediante corrientes inducidas. Además presentan la gran ventaja de verificar automáticamente las ecuaciones de la divergencia (Leyes de Gauss). Sin embargo presentan una pérdida notable de precisión en el cálculo de las intensidades de campo eléctrico y magnético debido a la propagación de errores en la diferenciación numérica; además su uso requiere de la definición de una condición de contraste (gauge) adecuada que depende de la formulación utilizada.

2. Las basadas en la resolución directa de las ecuaciones de Maxwell, este método se utiliza tanto en problemas estáticos como en transitorios, pasando por problemas armónicos. Esta formulación ocupa un lugar muy importante en el modelamiento de fenómenos de propagación de ondas como el diseño de antenas y dispositivos de microondas, entre otros. Este método se emplea básicamente para aplicaciones donde es importante analizar el acoplamiento eléctrico y magnético. Estas formulaciones permiten determinar directamente las intensidades de campo eléctrico y magnético sin necesidad de utilizar derivación numérica, obteniendo, generalmente resultados más exactos, además se obtienen campos continuos a

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

través de los elementos. Este método se caracteriza porque no verifica las Leyes de Gauss para el campo eléctrico y magnético. Mediante este tipo de formulación no ha sido necesario definir ningún gauge.

Los programas por MEF disponen de tres módulos de trabajo:

- **Pre-proceso**, Se prepara el modelo para el cálculo, donde se realizan las siguientes operaciones:
 - Definición de geometría, o importación desde otro software con extensión compatible.
 - Selección del tipo de elementos a utilizar en la maya, en función del tipo de cálculos a realizar, el software dispone de diferentes tipos de elementos que son especiales para cada aplicación, por ejemplo tensiones en 1D, 2D o 3D, electrostática, elementos de contacto, entre otras.
 - Selección de materiales a emplear, pueden ser definidos desde la librería del software o directamente por el usuario.
 - Asignación de elemento y propiedades de materiales a los diferentes componentes de los modelos.
 - Generación de la malla
 - Aplicación de cargas exteriores (puntuales, lineales o superficiales)
 - Aplicación de condiciones de frontera del modelo
 - las condiciones de contorno (cargas, solicitaciones y condiciones de frontera)

En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y preacondicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Cálculo**, es la parte del programa que realiza todo el cálculo del MEF y genera las soluciones, las operaciones que ejecutan son:
 - Selección del tipo de cálculo a realizar, por ejemplo análisis transitorio, en régimen armónico, estático, entre otras.
 - Configuración de los parámetros de cálculo. Selección de intervalos de tiempo, norma del error, número de iteraciones, etc.
 - Inicio del cálculo: el programa empieza transfiriendo las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, realiza la triangulación de la matriz, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.

Cuando el problema a tratar es un problema no lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro y se considera el equilibrio instantáneo en cada instante, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior. En general estos dos últimos tipos de problemas requieren un tiempo de cálculo sustancialmente más elevado que en un problema estacionario y lineal.

Post-proceso, esta herramienta permite la representación gráfica de los resultados, al igual que resultados indirectos que se pueden obtener operando las soluciones del modelo. En ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

Aplicaciones del MEF:

- ✓ Ingeniería estructural
- ✓ Resistencia de materiales
- ✓ Mecánica de fluidos
- ✓ Ingeniería nuclear

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- ✓ Electromagnetismo
- ✓ Campos eléctricos
- ✓ Propagación de ondas
- ✓ Conducción del calor
- ✓ Procesos de convección – difusión
- ✓ Ingeniería de petróleo
- ✓ Procesos de reacción – difusión

III. PROCESO DE MODELADO Y SIMULACIÓN

El software considera de manera global los siguientes pasos para realizar una simulación:

- Diseño de una geometría: Geometría en este software se define como, la figura geométrica que se ocupará como modelo para realizar la simulación. El programa tiene la opción de formar una geometría en diferentes dimensiones, 1D, 2D o 3D.

Este trabajo parte del modelado de una fibra óptica multi-revestimiento insensible a la curvatura, en 2D; con las siguientes características geométricas, Ver Tabla 5 Parámetros Geométricos del Modelo :

Tabla 5 Parámetros Geométricos del Modelo

FIBRA ÓPTICA MULTI-REVESTIMIENTO INSENSIBLE A LA CURVATURA	
Parámetro	Dimensión (Diámetro en μm)
Núcleo	6,461
Revestimiento # 1	11,879
Revestimiento # 2	20,169
Revestimiento # 3	29,408

Con el objetivo modelar de manera simultánea radios de curvatura en la fibra óptica desde 7,5 mm hasta 14,5 mm, con una diferencia de 1 mm, *se utilizó la herramienta PML* (Capas perfectamente acopladas); esta herramienta permite dar un dominio en el exterior del modelo, al cual se le da unas condiciones de frontera absorbentes donde la onda se atenúe hasta desaparecer por completo antes de alcanzar la frontera del modelo, esto se aplica con el objetivo de evitar las reflexiones exteriores de las ondas que se modelan en el interior de la fibra óptica.

La construcción geométrica de la PML se realiza a partir de rectángulos, con las siguientes dimensiones, ver Tabla 6 Dimensionamiento de la PML:

Tabla 6 Dimensionamiento de la PML

DIMENSIONAMIENTO GEOMETRICO CAPAS PERFECTAMENTE ACOPLADAS (PML)	
Ubicación	Dimensión (μm)
Superior	$(80 + X_{caus} + 20) * 20$
Lateral derecho	$X_{caus} + (20 * 160)$
Inferior	$(80 + X_{caus} + 20) * 20$
Lateral izquierdo	$(80 + X_{caus} + 20) * 160$

Esta geometría de la PML depende directamente de la variación del radio de curva de la fibra de vidrio, X_{caus} (12)

En la Figura 12 Esquema Geométrico de Modelo, se visualiza el modelo construido

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

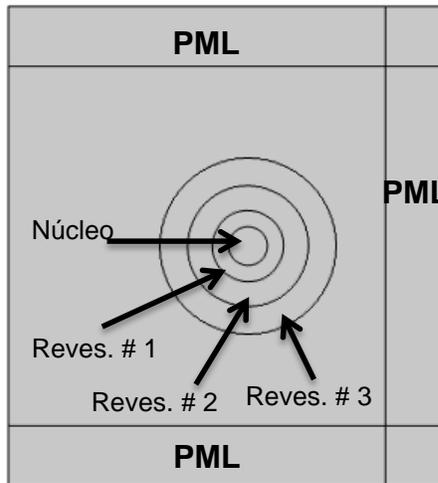


Figura 12 Esquema Geométrico de Modelo

A continuación se definen los materiales a utilizar en el modelo.

1. El material genérico a utilizar se calcula con la ecuación de dispersión de Sellmeier, la cual es una relación empírica entre el índice refractivo n de un material y la longitud de onda de la luz λ , transportada por el mismo, en la forma de una serie de términos de oscilador dipolos simples, como se observa a continuación:

$$n^2 = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} \quad (13)$$

Donde λ es la longitud de onda utilizada en cada modelo, en este caso se varía desde 1310 nm hasta 1625 nm; $A_1, A_2, A_3, \lambda_1, \lambda_2$ y λ_3 son llamadas coeficientes de Sellmeier, las cuales son determinadas por un ajuste de los datos experimentales a esta expresión (W.C. Tan, 2006)

De acuerdo a (W.C. Tan, 2006), para el vidrio puro se tienen los siguientes valores, ver Tabla 7 Coeficientes de Sellmeier para el Vidrio Puro:

Tabla 7 Coeficientes de Sellmeier para el Vidrio Puro

PROPIEDADES DE MATERIAL						
MATERIAL	A_1	A_2	A_3	λ_1	λ_2	λ_3
SiO_2 (sílice Puro)	0,696749	0,408218	0,890815	0,0690660	0,115662	9,900559

Fuente (W.C. Tan, 2006)

Con la relación y los valores descritos, se determina el índice de refracción para el vidrio puro (n_s) a diferentes longitudes de onda.

De acuerdo a (Yu Cheng, 2008), se definen los índices de refracción para el núcleo y los revestimientos del modelo, dependiendo de la longitud de onda utilizado para cada caso, de la siguiente manera, ver Tabla 8 Cambio en índice de refracción para cada capa:

Tabla 8 Cambio en índice de refracción para cada capa

INDICES DE REFRACCIÓN FIBRA ÓPTICA MULTI-REVESTIMIENTO INSENSIBLE A LA CURVATURA	
Parámetro	Δ (%)
Núcleo	0,600
Revestimiento # 1	-0,400
Revestimiento # 2	0,210
Revestimiento # 3	-0,100

2. Para definir el material final de cada uno de los elementos que componen la fibra óptica, se introduce en el software las ecuaciones de mapeo conformal (Cole, 2007), para poder realizar la transformación de una fibra óptica curvada a una análoga recta.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La fibra de vidrio curvada sufre cambios físicos en su composición debido a los esfuerzos de tracción y compresión a los cuales se ve sometido el material. Con esta transformación los índices de refracción del núcleo y el revestimiento toman los siguientes valores dependientes del radio de curvatura R ,

$$n'_1 = n_i \left(1 + \frac{x}{R_{eff}} \right), i = 1, 2 \quad (14)$$

Donde n_i es el índice de refracción de la capa (el cual depende la longitud de onda) y R_{eff} Para una fibra de vidrio puro, se puede aproximar con la siguiente expresión: $R_{eff} = R * 1,28$, donde R es el radio de curvatura de la fibra de vidrio

3. Se hace necesario definir un índice de refracción promedio (n_{prom}) para dar las propiedades de material a las capas perfectamente acopladas (PML)

$$n_{prom} = \frac{n_{1C} + n_{1R}}{2} \quad (15)$$

$n_i = n_i \left(1 + \frac{x}{R_{eff}} \right), i=1, 2$ (14, se reemplazan los siguientes valores y parámetros:

✓ Para el núcleo (n_{1C}):

$$n_i = n_s + 0,006$$

$$x = 6,461 \text{ (Radio del núcleo)}$$

$$R_{eff} = R * 1,28 \text{ (} R = \text{Radio de curvatura de la fibra óptica)}$$

✓ Para el revestimiento (n_{1R}):

$$n_i = n_s \text{ (Según relación de Sellmeier)}$$

$$x = 29,408 \text{ (Radio del revestimiento más externo)}$$

$$R_{eff} = R * 1,28 \text{ (} R = \text{Radio de curvatura de la fibra óptica)}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. Se introduce en el software el parámetro de X_{caus} (X_{trans}), con el objetivo de modificar el radio de curvatura de la fibra óptica.

$$X_{caus} = X_{trans} = R_{eff} \left(\frac{n_{prom}}{n_s} - 1 \right) \quad (16)$$

- La especificación de una física(s): Cada una de las físicas que comprende el programa, están delimitadas por un sistema de ecuaciones que permiten realizar el análisis en el modelo. También se pueden modificar las ecuaciones que están definidas en el programa, de forma manual o bien con ayuda de un módulo del mismo software.

Para realizar el análisis del modelo se utiliza el *módulo Wave Optics Module*, utilizado para el diseño y la simulación precisa de componentes ópticos, dispone de varias formulaciones 2D y 3D para análisis modal de frecuencias propias, simulación EM en el dominio de la frecuencia o en el dominio temporal.

Proporciona herramientas dedicadas para propagación de ondas electromagnéticas en medios ópticos lineales y no lineales para simulación precisa de componentes y optimización del diseño. El innovador método *Beam Envelopes Method* para propagación de ondas electromagnéticas completas, discretiza directamente las ecuaciones de Maxwell. En este caso, el campo eléctrico se expresa como el producto de una función envolvente que varía lentamente y una función de fase exponencial que varía rápidamente. Esto permite simulaciones precisas de grandes sistemas ópticos donde las dimensiones de la geometría pueden ser mucho mayores que la longitud de onda, y donde las ondas de luz no pueden ser aproximadas por rayos. Los métodos de propagación electromagnética de ondas completas convencionales, también disponibles en el módulo, son complementados con el método de envolventes de haz *Beam Envelopes Method*.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El soporte para índices de refracción anisótropos genéricos, tensores de permitividad o permeabilidad permite la simulación de propagación de ondas a través de medios ópticos que incluyen materiales giromagnético o metamateriales con propiedades de ingeniería.

➤ Seleccionar y generar un tipo de malla: seleccionar la malla depende del tipo de solución que se elija, el software tiene nueve tipos de maya, su diferencia radica en el tamaño de los elementos generados, y su forma las cuales pueden ser triangulares o cuadradas (mapeados). Se hace necesario mallar el modelo con el objetivo de aplicar el MEF, y encontrar la solución aproximada del modelo.

Las mayas con elementos más gruesos generan una solución que no es muy aproximada a la real del problema; entre más fina sea la malla más convergencia se genera en el modelo. Sin embargo seleccionar un tamaño muy fino puede generar conflictos internos en los solvers del software, y no llegar a ninguna solución.

Para realizar las simulaciones, la fibra óptica se malla con elementos tipo triángulo, los cuales se eligen de tamaño Extra Fino, con las siguientes características:

- Elemento de mayor tamaño 3,2 μm
- Elementos de menor tamaño 0,012 μm
- Número de Iteraciones: 8

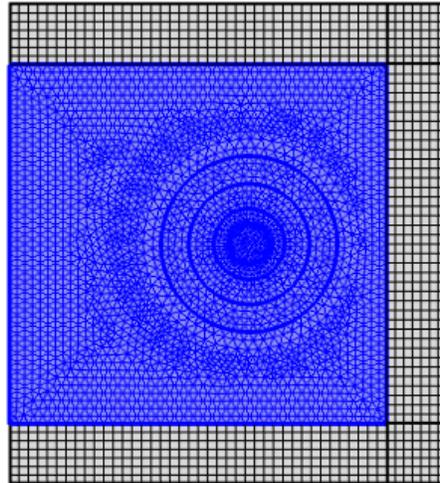


Figura 13 Mallado de Fibra Óptica

Para el mallado de las capas perfectamente acopladas (PML) se utiliza una malla tipo mapeo (cuadrados), los cuales se eligen de tipo Extra Finos, con las siguientes características:

- Elemento de mayor tamaño 3,2 μm
- Elementos de menor tamaño 0,012 μm
- Número de Iteraciones: 8

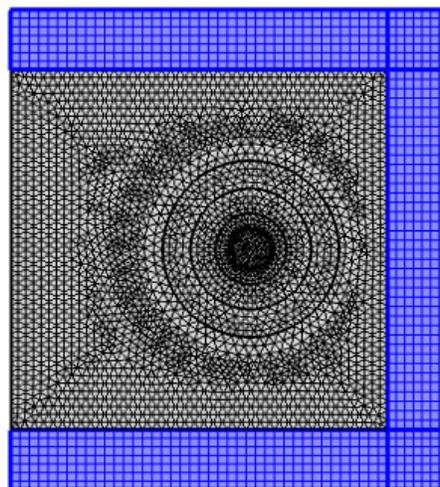


Figura 14 Mallado de PML

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Elegir el tipo de estudio: Depende del tipo de problema del que se espera obtener una solución y esta se genera a partir de métodos numéricos.

Dentro del módulo seleccionado, se utiliza el tipo de análisis: Ondas electromagnéticas, Dominio de Frecuencia (ewfd); el cual se utiliza la solución directa de las ecuaciones de Maxwell como solvers base para el modelo realizado.

Además se define los límites externos del modelo de tipo PMC (Conductor Perfectamente Magnético),

- Finalmente se realiza la simulación del modelo construido, y se computa en el software para obtener una solución aproximada.

A partir de los resultados obtenidos, es necesario calcular parámetros fundamentales en la caracterización de una fibra óptica, como lo son el área efectiva (A_{ef}) y el factor de confinamiento (Γ); de acuerdo a las

$$\Gamma = \frac{\int_0^a |E_a(r)|^2 r dr}{\int_0^a |E_a(r)|^2 r dr}$$

$$(5, \text{ Radio de campo modal: } \frac{w}{a} = 0,65 + 1,619V^{-3/2} + 2,879V^{-6} \quad (6,$$

$$\text{Área efectiva: } A_{ef} \approx \pi w^2 \quad (7 \quad \text{y} \quad \text{Factor} \quad \text{de}$$

$$\text{confinamiento: } \Gamma \approx 1 - \exp\left(\frac{-2a^2}{w^2}\right) \quad (8$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I. COMPARATIVO ENTRE FIBRAS ÓPTICAS SIMULADAS

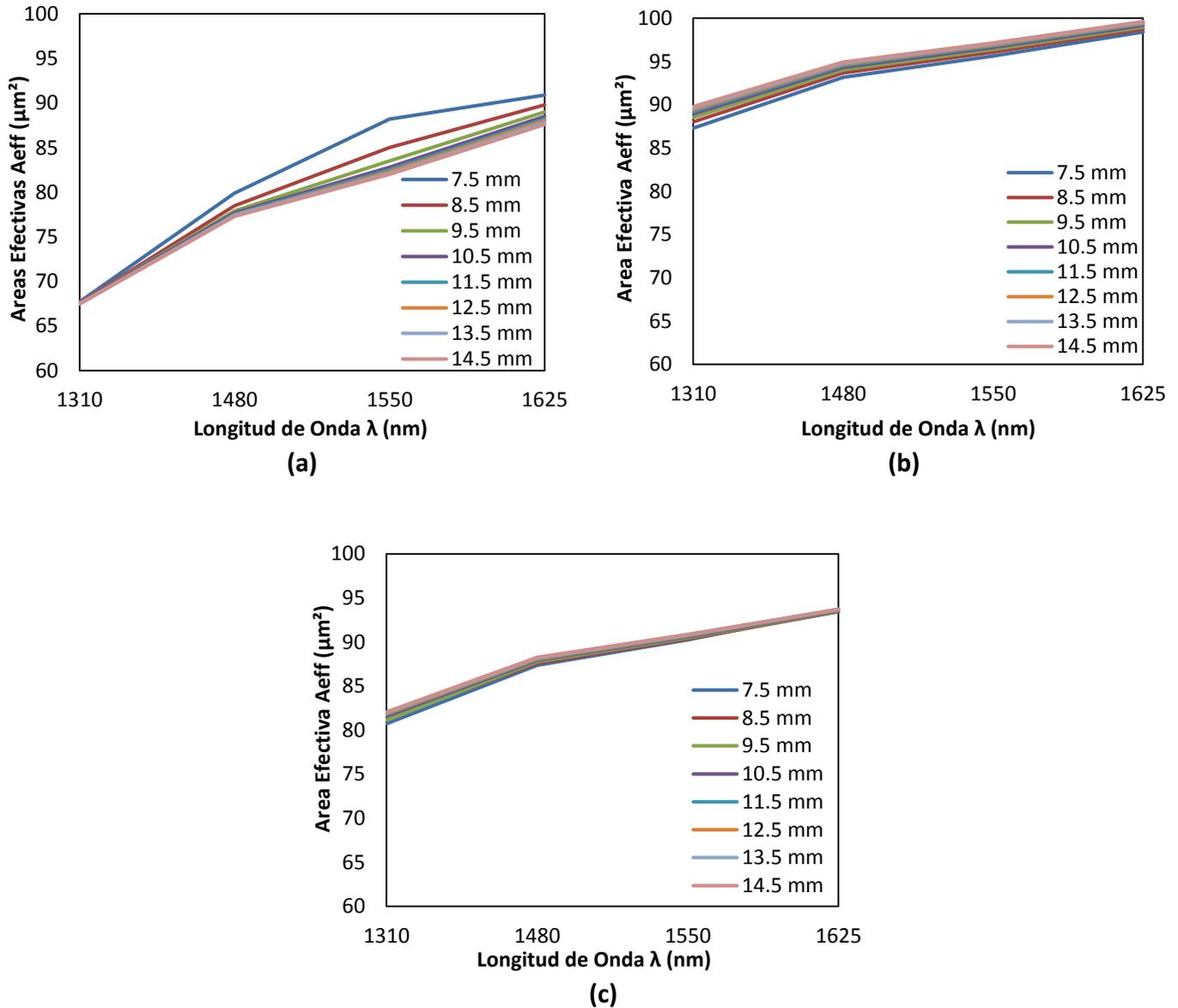


Figura 15 Areas Efectivas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual

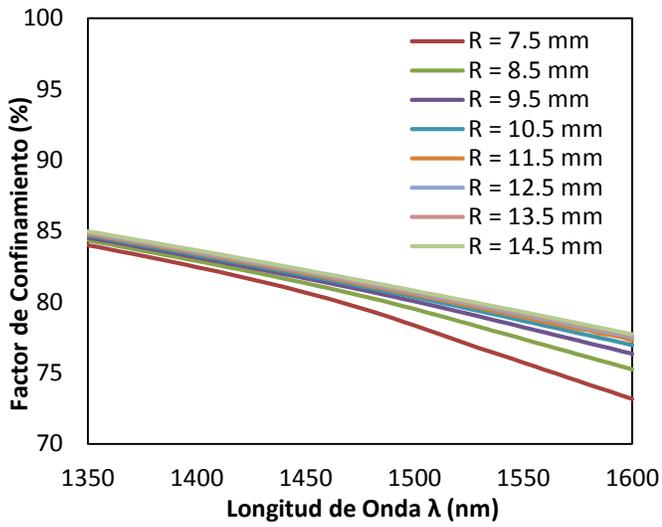
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

De manera general, en las tres fibras simuladas se observa que el área de confinamiento aumenta a mayor longitud de onda.

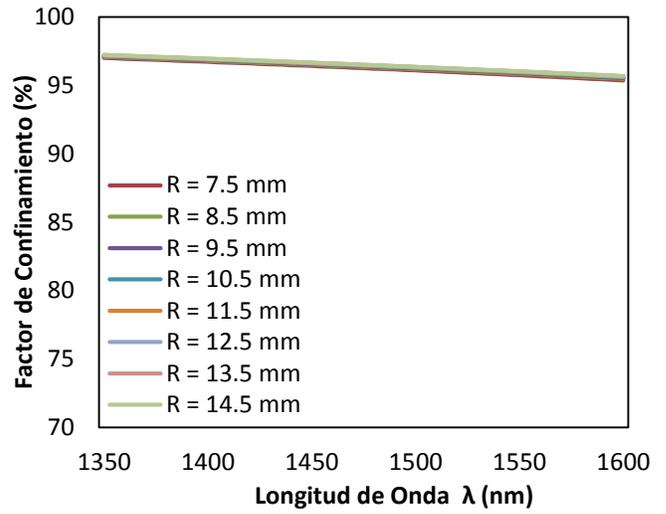
De acuerdo a las gráficas de áreas efectivas, se puede observar que el comportamiento de del área efectiva en la fibra índice escalonado es muy similar a la fibra de índice gradual, con respecto a las longitudes de onda analizadas, ya que en ambos casos se tienen alrededor de 12 unidades en μm^2 de área efectiva para los radios de curvatura. Sin embargo se observa que el comportamiento de la figura C es mucho más estable con respecto a los radios de curvatura. Para la fibra SMF 28, se observa un comportamiento muy inestable, y el área efectiva se define en 30 unidades de μm^2 , tomando como referencia las mismas longitudes de ondas de las gráficas anteriores.

Para las tres gráficas, se observa que el factor de confinamiento disminuye con el aumento de la longitud de onda.

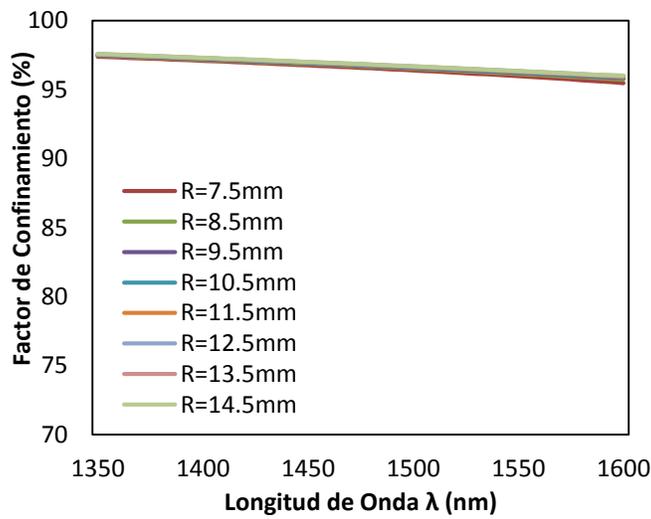
El factor de confinamiento para la figura a) se observa con un comportamiento altamente inestable, ya que hay gran diferencia de porcentaje para los diferentes radios de curvaturas, en las longitudes de onda analizadas. Para las gráficas b) y c) se observa un comportamiento muy similar; sin embargo para la fibra de índice gradual la diferencia en el porcentaje de factor de confinamiento es inferior para los radios de curvatura analizados.



(a)

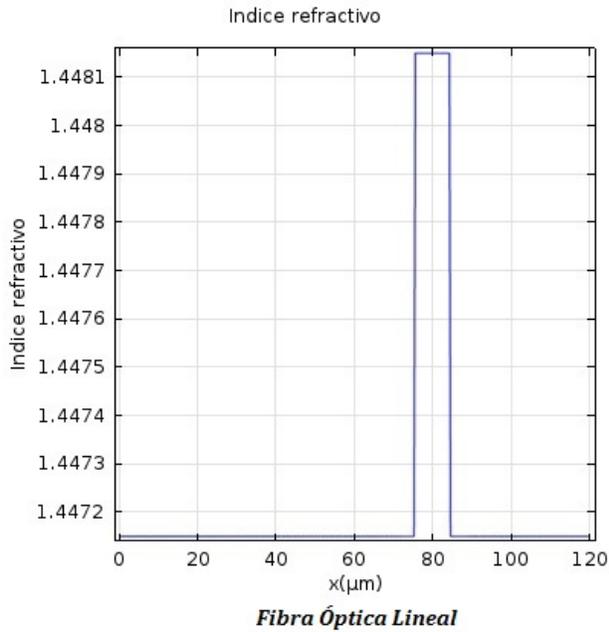


(b)

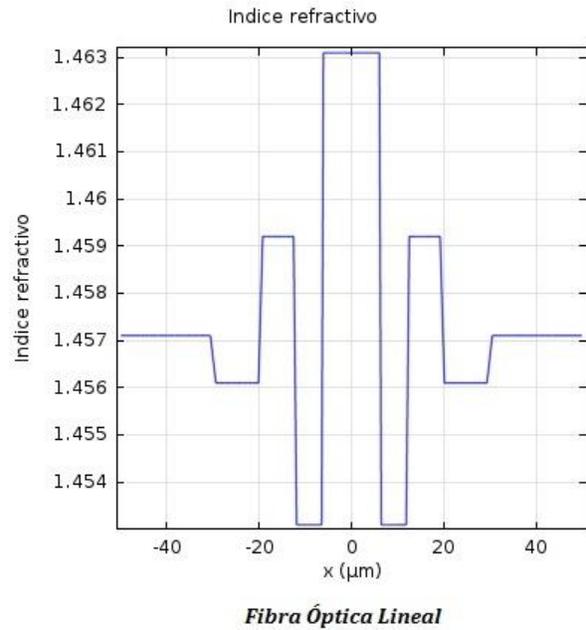


(c)

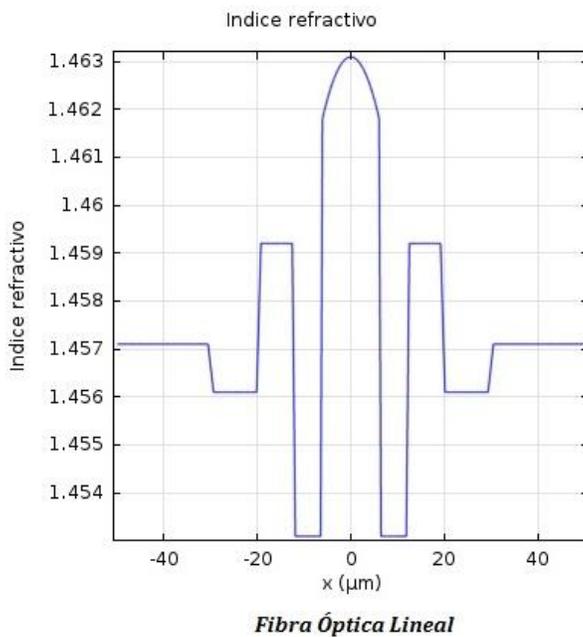
Figura 16 Factor de Confinamiento, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual



(a)



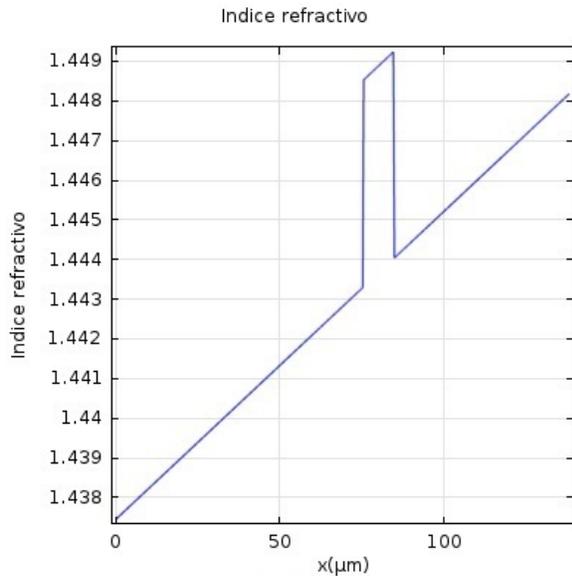
(b)



(c)

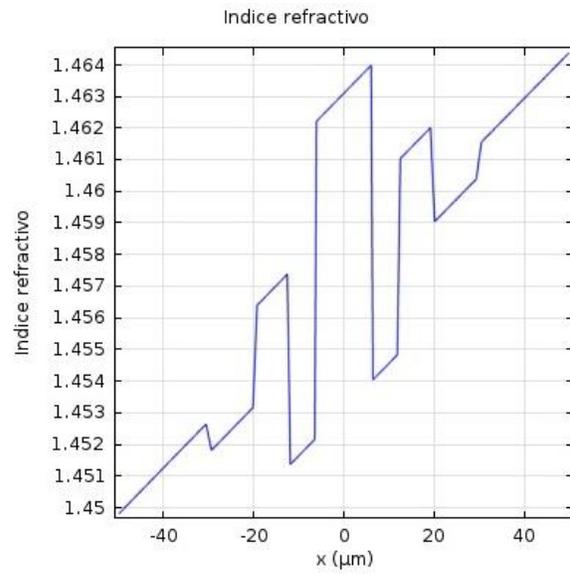
Figura 17 Índice Refractivo de Fibras Ópticas Simuladas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual

En la figura 17 a, b y c se muestra el perfil de índice refractivo sin curvar, para las tres fibras de vidrio simuladas.



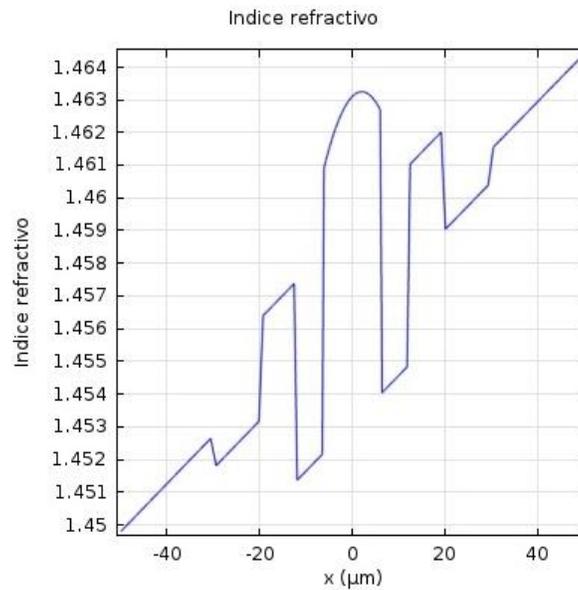
**Fibra Óptica Curvada
(Mapeo Conformal)**

(a)



**Fibra Óptica Curvada
(Mapeo Conformal)**

(b)

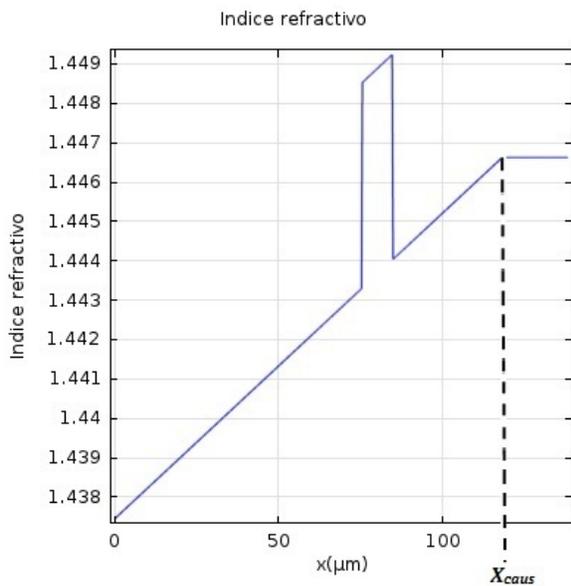


**Fibra Óptica Curvada
(Mapeo Conformal)**

(c)

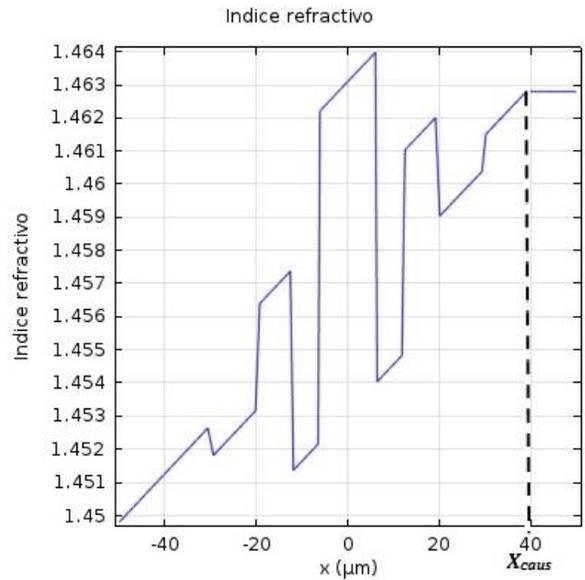
Figura 18 Índice Refractivo de Fibras Ópticas Simuladas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual

En la figura 18 a, b y c se muestra el perfil de índice refractivo de las fibras de vidrio curvadas.



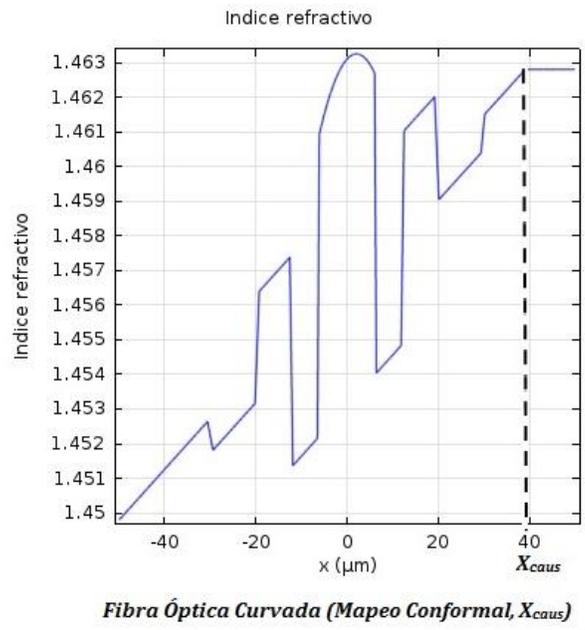
Fibra Óptica Curvada (Mapeo Conformal, X_{caus})

(a)



Fibra Óptica Curvada (Mapeo Conformal, X_{caus})

(b)



(c)

Figura 19 Índice Refractivo de Fibras Ópticas Simuladas, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual

En la figura 19 se muestra el perfil de índice refractivo de las fibras curvadas, en las cuales se incluye una región con índice de refracción constante necesaria para que en la simulación no se obtengan modos que se encuentren por fuera del núcleo.

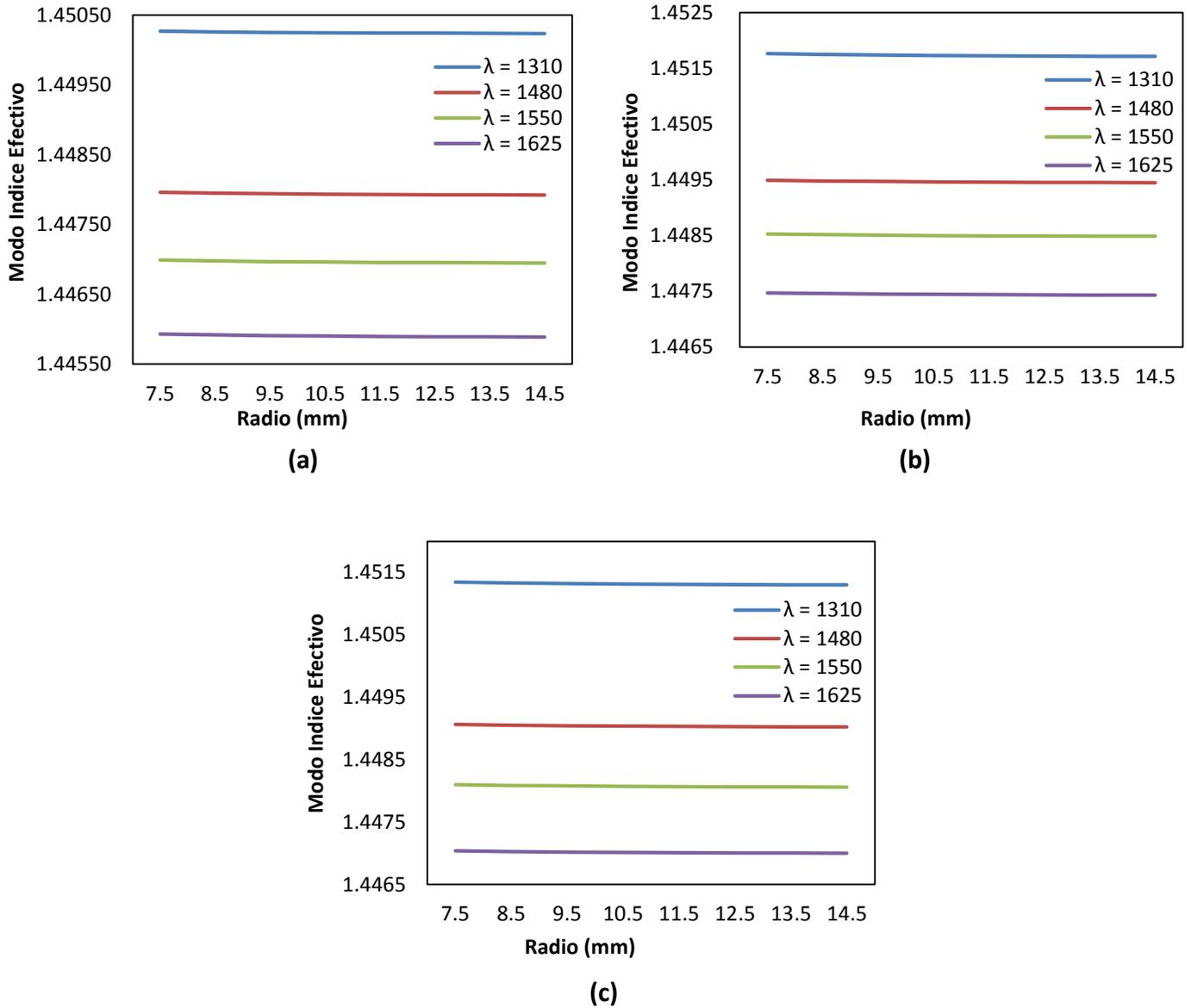


Figura 20 Modo de Índice Efectivo, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual

En las imágenes de la figura 20, se observa que las variaciones en el índice efectivo no son significativas con respecto a los radios de curvatura utilizados, lo que demuestra que las deformaciones de la fibra de vidrio no están modificando las propiedades ópticas del material que la componen.

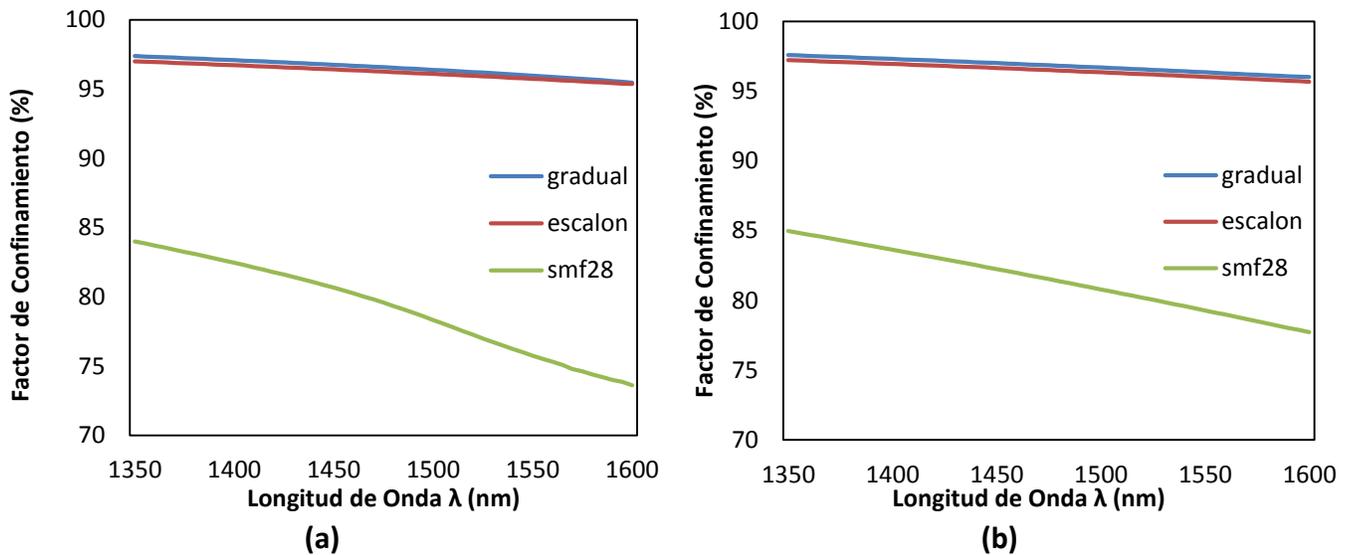


Figura 21 Factor de Confinamiento para a) R 7.5 mm, b) 14.5 mm en tres tipos de Fibras Ópticas

En la Figura 21 se comparan el factor de confinamiento para los radios de curvatura de 7,5 mm y 14,5 mm, en las tres fibras analizadas, donde se visualiza la gran diferencia de comportamiento entre la SMF 28 y las fibras multirevestimiento. Al mismo tiempo se evidencia la similitud de este factor de Confinamiento para la fibra de índice escalonado y la fibra de índice gradual.

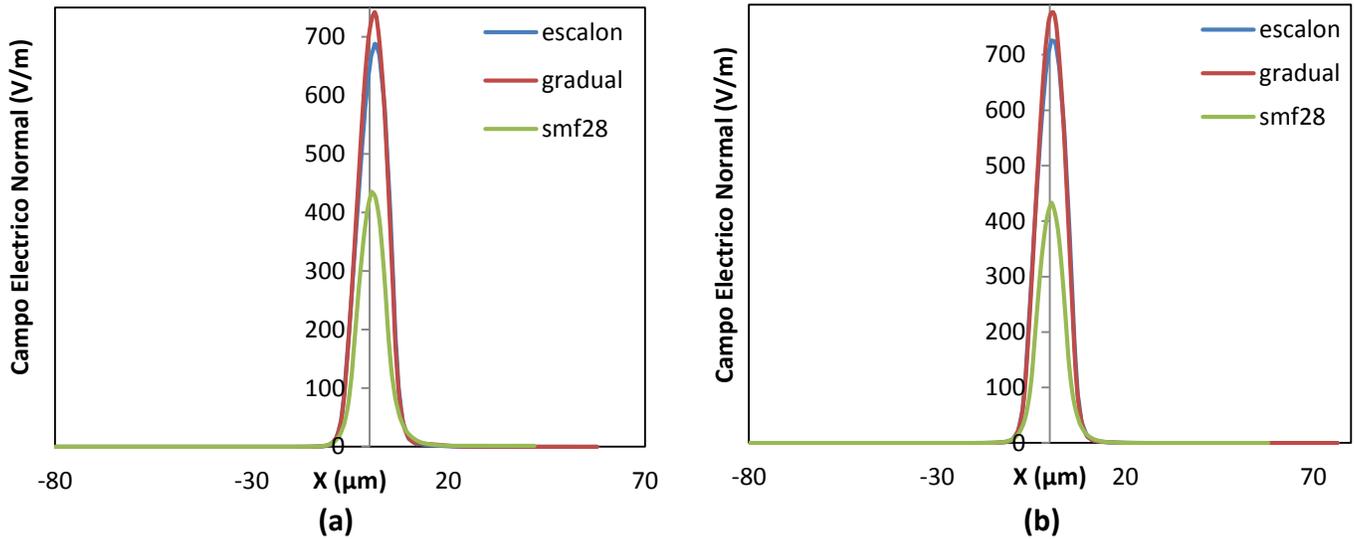


Figura 22 Campo Eléctrico Normal (V/m) para λ 1310 nm, en a) R 7.5 mm, b) R 14.5 mm, para tres tipos de Fibras Ópticas

En la imagen 22 se comparan el Campo Eléctrico para los radios de curvatura de 7,5 mm y 14,5 mm, a una longitud de onda de 1310 nm, en las tres fibras analizadas; donde se visualiza la gran diferencia de comportamiento entre la SMF 28 y las fibras multirevestimiento. Al mismo tiempo se evidencia la similitud del comportamiento del Campo Eléctrico para la fibra de índice escalonado y la fibra de índice gradual, sin embargo el campo eléctrico se canaliza mejor por el núcleo de la fibra de vidrio de índice gradual.

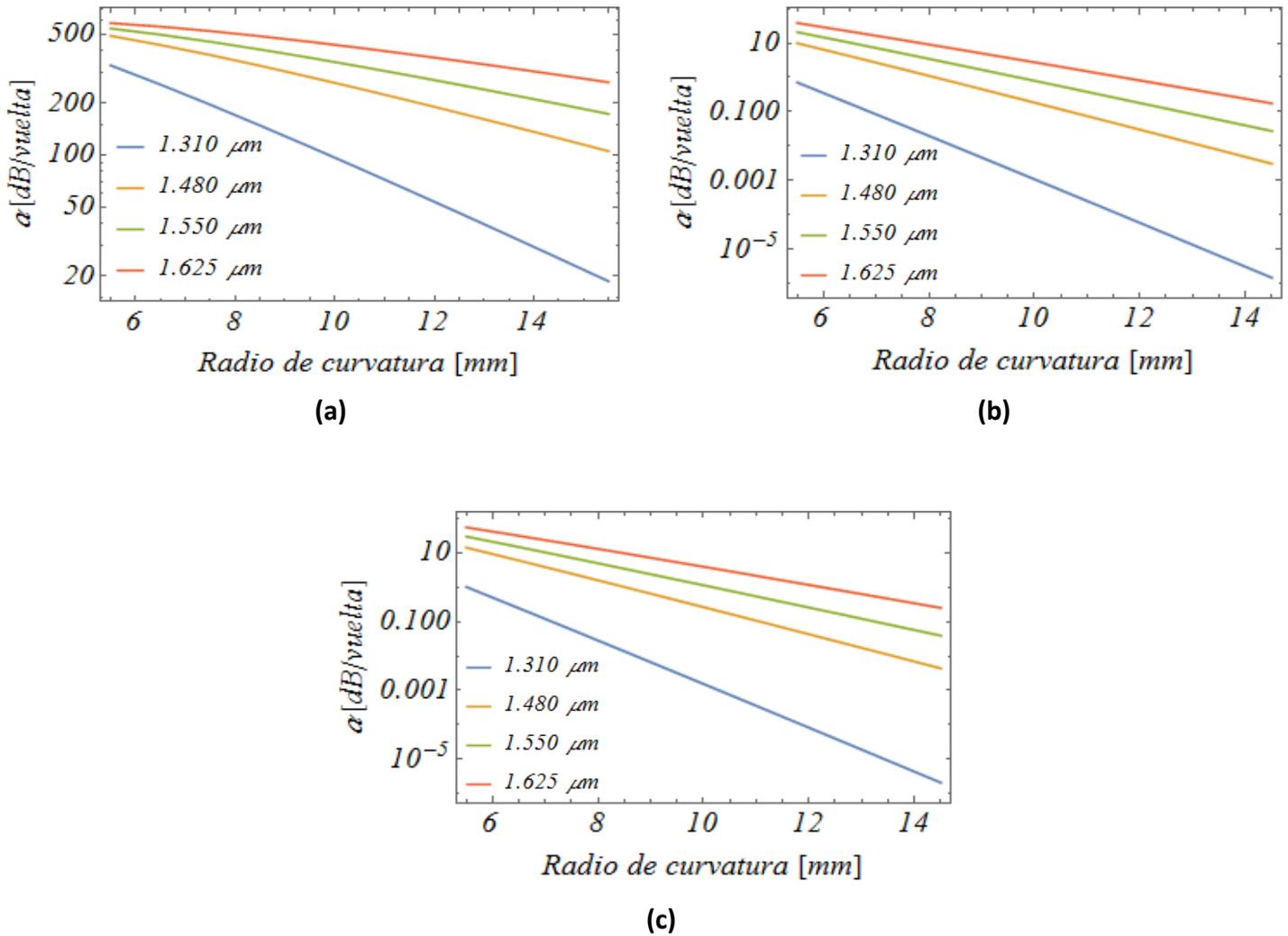


Figura 23 Pérdidas de Campo Eléctrico, a) Fibra Óptica Monomodo SMF 28, b) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo, c) Fibra Óptica Multi-revestimiento Monomodo de Índice Gradual

De acuerdo a la Figura 23, se comparan las pérdidas de Campo Eléctrico para todos los radios de curvatura, en las tres fibras analizadas; donde se visualiza que para la fibra SMF28 las pérdidas son considerables, ya que son de 200 dB/vuelta aproximadamente, mientras que en las fibras multirevestimiento son notablemente inferiores. Además las en las fibras de índice gradual e índice escalonado, los valores de las pérdidas son muy similares, siendo inferiores en la fibra de índice gradual.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para las tres imágenes que conforman esta figura, se cumple que la menor pérdida es obtenida a una longitud de onda de 1310 nm, por consiguiente es la ventana más estable para las tres fibras ópticas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Se muestra que para radios de curvatura superiores a 7.5mm el factor de confinamiento es mayor en las fibras ópticas Multi-revestimiento (perfil de índice de refracción asistidas por canales) que en la fibra óptica estándar, las diferencias de este parámetro entre estas dos fibras aumentan a medida que se aumenta la longitud de onda, manteniéndose casi constante en las primeras. Así mismo, puede observarse que para todos los radios de curvatura simulados, el área efectiva de la fibra mono-modo estándar, cambia fuertemente a medida que se aumenta la longitud de onda, mientras que para las fibras Multi-revestimiento este cambio es menor.
- El número de canales y la diferencia de índice de refracción en las fibras Multi-revestimiento, determina que tanto se mantiene el confinamiento de la luz en el núcleo de la fibra cuando esta es curvada.
- Las fibras multi-revestimiento propuestas tienen comportamientos similares en cuanto sus parámetros de atenuación, área efectiva y pérdidas por curvaturas, sin embargo en este último hay una pequeña mejora en las fibras multi-revestimiento con perfil de índice gradual.
- Puede también observarse que las pérdidas por vuelta para radios de curvatura cercano a los 7.5 mm son 50 veces mayores en la fibra óptica mono-modo estándar, si se compara con las fibras Multirevestimiento, este valor aumenta hasta un millón de veces para los radios cercanos a los 14.5 mm.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Vale la pena estudiar el comportamiento de las fibras multi-revestimiento haciendo especial énfasis en las variaciones de índice de refracción.
- De acuerdo los resultados en las pérdidas por vuelta, a futuro se considera la posibilidad de estudiar el comportamiento de estas fibras cuando se varía la función que describe los cambios de índice en el núcleo, con lo anterior, creemos que es posible diseñar fibras que disminuyan un poco las pérdidas.
- Por último, en un trabajo futuro se propone diseñar fibras multi-revestimiento, cuyo perfil de índice sea gradual en cada una de las regiones excepto en el revestimiento más exterior, buscando establecer como varían otros parámetros de propagación como la dispersión cromática y el factor de no-linealidad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

-
- COMSOL. (2015). Recuperado el 06 de 2015, de <http://www.comsol.com/>
- (2015). Elementos y Equipos Eléctricos.
- Oficios Técnicos*. (2015). Recuperado el junio de 2015, de http://www.tecnoficio.com/optica/fibra_optica_conceptos_2.php?psps_page=4
- Bizkaia, E. (2015). *Proyecto innovación sobre Fibras y Redes*. Recuperado el junio de 2015, de <http://fibraoptica.blog.tartanga.net/2014/01/21/diametro-de-campo-modal-una-caracteristica-muy-importante-en-las-fibras-monomodo/>
- Cole, R. T. (2007). Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment. *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, 899-909.
- Company, T. S. (1995). *Siemon Network Cabling Solutions*. Recuperado el junio de 2015, de https://www.siemon.com/la/white_papers/08-03-03-light-it-up.asp
- Cruz, O. M. (s.f.). *Modulo Introductorio Principios Genrales de los Sistemas de Fibra Optica*. Argentina.
- DUTARI, R. E. (2012). FIBRA ÓPTICA: ORIGEN, ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y APLICACIONES. *MONOGRAFÍA*. PANAMÁ.
- Fibras Opticas*. (s.f.). Recuperado el junio de 2015, de <http://www.yio.com.ar/fibras-opticas/>
- Ing. Miguel Lattanzi, L. A. (s.f.). *Redes FTTx, Conceptos y Aplicaciones*. Argentina.
- Mera, R. P. (2015). *FIBRA OPTICA*. Recuperado el junio de 2015, de <https://ropalmaromera.wordpress.com/funcionamiento-de-las-fibras-opticas/>
- NTDhoy, S. M. (2001). *fibraopticahoy.com*. Recuperado el 15 de 2 de 2015, de <http://www.fibraopticahoy.com/porque-usar-fibra-optica-plastica/>
- T, I. . (29 de 10 de 2012). Series G: Transmission Systems and media, Digital Systems and Networks. *Recomendation ITU - T G. 657*.
- textoscientificos.com*. (s.f.). Recuperado el 15 de 02 de 2015, de <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/tiposfibra>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

The Fiber Optic Association, Inc. (s.f.). Recuperado el 15 de 2 de 2015, de
<http://www.thefoa.org/ESP/>

(2006). Fundamental Optical Properties of Materials I. En K. K. W.C. Tan, *Optical Properties of Condensed Matter and Applications* (págs. 7-8). John Wiley & Sons, Ltd.

Wikitel. (s.f.). Recuperado el 15 de 2 de 2015, de <http://wikitel.info/wiki/FTTx>

Yu Cheng, Q. H.-N. (2008). Bend-optimized optical fiber with S+C+L bands for FTTH applications. *Optics Communications*, 5775-5778.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES _____

FIRMA ASESOR Nelson Gomez

FECHA ENTREGA: 06/10/2015

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____