

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias de la Electrónica
Licenciatura en Electrónica



“Análisis de la propagación de la radiación en guías de onda ópticas con
dimensiones menores a la longitud de onda de operación”

TESIS

Presentada como requisito parcial para la obtención del título de:

Licenciada en Electrónica

Presenta:

Nancy Elizabeth González Sierra

Asesores:

Dr. Arnulfo Luis Ramos

Dra. Luz del Carmen Gómez Pavón

Puebla, Pue., México.

Julio de 2015

Agradecimientos

Agradezco a Dios su compañía, por brindarme vida y fortaleza.

Agradezco especialmente a mis asesores de tesis, el Dr. Arnulfo Luis Ramos y la Dra. Luz del Carmen Gómez Pavón, por su confianza, motivación y apoyo, así como por los conocimientos transmitidos para la realización de este trabajo de tesis.

Agradezco profundamente al comité revisor, el Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco y el Dr. Plácido Zaca Morán, por su paciencia y por las observaciones realizadas que permitieron enriquecer este trabajo de tesis.

Agradezco a los proyectos que han formado parte esta investigación, así como las becas que han permitido que llegue a su fin, proyecto VIEP 2014.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP por la formación brindada, la dedicación constante de los profesores y cuerpo académico, a mis compañeros y amigos.

Resumen

La presente tesis aborda el estudio del análisis de guías de onda de dimensiones nanométricas mediante una técnica numérica integrada en el software de simulación LUMERICAL (enfocado en el área de fotónica), del cuál se utilizarán en específico dos herramientas: Analizador de Modos (en inglés MODE Solutions) y FDTD. Es a partir de dichas herramientas que se analiza la propagación de la luz en fibras micro-nanométricas y fibras cónicas.

Es a través del Analizador de Modos que se obtiene el cálculo del modo fundamental en una fibra micro-nanométrica a la cuál se hacen variaciones en el índice de refracción del revestimiento, en la longitud de onda guiada en la fibra y el radio de la fibra. Adicionalmente mediante otra perspectiva, empleando FDTD, se analizan las propiedades de propagación de la luz en las fibras micro-nanométricas y fibras cónicas.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	9
1.2. Descripción de la tesis	9
2. Fundamentos electromagnéticos	10
2.1. Propagación de ondas	10
2.1.1. Reflexión y refracción	10
2.1.2. Ondas electromagnéticas en una interfaz	12
2.1.3. Reflexión total interna	14
2.1.4. Ondas evanescentes	14
2.2. Guías de onda ópticas	18
2.2.1. Guías de onda slab	19
2.2.2. Guías de onda rectangulares	20
2.2.3. Guías de onda cilíndricas	20
2.3. Fibras ópticas	21
2.3.1. Diseño de las fibras ópticas	21
2.4. Clasificación de la fibras ópticas	22
2.4.1. Fibras monomodo	24
2.4.2. Fibras de índice escalonado	24
2.4.3. Fibras de índice gradual	24
2.4.4. Características de transmisión en las fibras ópticas	25
2.5. Modos ópticos en una guía de onda circular	26
2.5.1. Ecuaciones de Maxwell	26
2.5.2. Ecuaciones de Maxwell para una fibra óptica de índice escalonado	28
2.5.3. Solución de la ecuación de onda	29
2.5.4. Solución de la ecuación de onda en el núcleo	30
2.5.5. Solución de la ecuación de onda en el revestimiento	30
2.5.6. La ecuación de dispersión	31
2.5.7. Solución de la ecuación de dispersión	32
2.6. Micro-nano fibras ópticas	33
2.6.1. Modelo matemático	33
2.6.2. Propiedades ópticas	34
2.7. Fibras cónicas	34

2.7.1.	Solución de la ecuación de onda	34
2.7.2.	Propagación de la luz a través de la fibra cónica	35
3.	Guías de onda sublongitud de onda: Análisis y diseño	37
3.1.	Análisis en guías de onda ópticas	38
3.2.	Analizador de Modos	39
3.2.1.	Descripción y diseño de una fibra óptica micro-nanométrica	39
3.2.1.1.	Propiedades del material	41
3.2.1.2.	Dimensiones de la estructura	41
3.2.1.3.	Región de simulación	41
3.3.	FDTD	41
3.3.1.	Descripción y diseño de una fibra cónica	42
3.3.1.1.	Estructura <i>custom</i>	43
3.3.1.2.	Empleo de estructuras <i>custom</i>	44
3.3.1.3.	Estructuras empleadas para formar la fibra cónica	45
3.3.1.4.	Tipo de fuente	45
3.3.1.5.	Monitor de película	46
3.3.2.	Diseño de una fibra cónica empleando estructura de grupo y parámetros de barrido	47
3.3.2.1.	Construyendo una estructura de grupo	47
3.3.2.2.	Parámetros de barrido para la fibra cónica	48
4.	Resultados	51
4.1.	Análisis modal en una micro-nano fibra óptica	51
4.1.1.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 420 nm	52
4.1.2.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 550 nm	54
4.1.3.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 633 nm	55
4.1.4.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 750 nm	56
4.1.5.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 900 nm	57
4.1.6.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 1550 nm	58
4.2.	Campo evanescente en una micro-nano fibra óptica	60
4.2.1.	Gráficas de mérito en una micro-nano fibra óptica	61
4.3.	Análisis modal en una micro-nano fibra óptica: variación en el índice de refracción	63
4.3.1.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 420 nm	64
4.3.2.	Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 750 nm	65
4.4.	Propagación de la luz en una fibra cónica	66

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	v
5. Conclusiones	69
I Apéndice	73
A. El Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo	74
A.1. Descripción de FDTD	74
A.2. Algoritmo de Yee	75
A.3. Capa de Acoplamiento Perfecto	76

Índice de figuras

1.1. Representación (en la dirección z) de la distribución de potencia en alambres de dióxido de silicio a una longitud de onda de la luz de 633 nm con diámetros de (a) 400 nm y (b) 200 nm [6].	3
1.2. Modo fundamental de una fibra micro-nanométrica con una longitud de onda de la luz $\lambda=633$ nm y el diámetro de la fibra (a) $d=400$ nm, (b) $d=200$ nm [8].	4
1.3. Distribución de potencia en micro-nano fibras de dióxido de silicio para una longitud de onda de la luz guiada de 633 nm con diámetros de la fibra de (a) 800 nm, (b) 400 nm y (c) 200 nm en una perspectiva 3D, y (d) 800 nm, (e) 400 nm, (f) 300 nm y (g) 200 nm en una perspectiva 2D [9].	5
1.4. Dependencia de la fracción de potencia propagada como campo evanescente η_{EF} en función de la longitud de onda normalizada λ/r con diferentes índices de refracción del revestimiento [10].	6
2.1. (a) Rayos incidente, transmitido y reflejado.	11
2.2. Ondas planas incidentes en la frontera entre dos medios.	12
2.3. Reflexión interna.	14
2.4. Guía de onda óptica en la que se representa el confinamiento de la luz por reflexión total interna con un diámetro en el núcleo (a) relativamente grande (b) relativamente pequeño [1].	15
2.5. Guiado óptico en una micro o nanofibra con diámetros en el núcleo menores que la longitud de onda de la luz que se propaga [1].	16
2.6. Guías de onda típicas.	18
2.7. Guía de onda “slab”[29].	19
2.8. Geometría de una guía de onda rectangular [27].	20
2.9. Guía de onda cilíndrica [29].	21
2.10. La fibra óptica es una guía de onda cilíndrica.	22
2.11. Fibra óptica monomodal a) vista frontal, b) vista transversal [38].	22
2.12. Fibra óptica multimodal a) vista frontal, b) vista transversal [38]. [38].	23
2.13. Tipos comunes de fibra óptica: a) fibra multimodo de índice escalonado b) fibra monomodo de índice escalonado y c) fibra multimodo de índice gradual [37].	23
2.14. Confinamiento de la luz por reflexión total interna, cuando el ángulo de incidencia es mayor que el θ_c [3].	24
2.15. Trayectoria de los rayos en una fibra de índice gradual [3].	25

2.16. Coordenadas cilíndricas.	28
2.17. Perfil de índice de una micro-nano fibra que posee de recubrimiento el aire [1].	33
2.18. Comportamiento característico de la propagación de la radiación en una fibra cónica [1].	35
3.1. Fibra nanométrica definida en el Analizador de Modos.	40
3.2. Mallado definido en el Analizador de Modos.	40
3.3. Fibra taper.	42
3.4. Vista x, y de la fibra cónica: tipo de estructuras empleadas y descripción de los elementos de simulación.	43
3.5. (a) Estructura <i>custom</i> . (b) Forma predeterminada de la estructura <i>custom</i> . . .	43
3.6. (a) Parámetros de la ecuación <i>custom</i> . (b) Estructura <i>custom</i> construida a partir de las ecuaciones 1 y 2.	44
3.7. Definición de estructuras usadas para crear la fibra taper, vista x, y	45
3.8. Fuentes disponibles en FDTD.	46
3.9. Estructura de grupo.	48
3.10. Estructura primitivas añadidas a la estructura de grupo.	49
4.1. Cálculo del modo fundamental para una longitud de onda $\lambda=550$ nm y $d=250$ nm, en una vista de dos dimensiones.	52
4.2. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con: (a) $d=800$ nm, (b) $d=700$ nm, (c) $d=400$ nm, (d) $d=300$ nm, (e) $d=250$ nm, (f) $d=200$ nm, a longitud de onda de la luz de 420 nm.	53
4.3. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=600$ nm, (b) $d=300$ nm, (c) $d=200$ nm, (d) $d=150$ nm, a longitud de onda de la luz de 550 nm.	54
4.4. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro : (a) $d=750$ nm, (b) $d=650$ nm, (c) $d=550$ nm, (d) $d=350$ nm, (e) $d=250$ nm, (f) $d=150$ nm, a longitud de onda de la luz $\lambda=633$ nm.	55
4.5. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=700$ nm, (b) $d=550$ nm, (c) $d=350$ nm, (d) $d=200$ nm, a longitud de onda de la luz de 750 nm.	56
4.6. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=800$ nm, (b) $d=600$ nm, (c) $d=450$ nm, (d) $d=200$ nm, a una longitud de onda de la luz de 900 nm.	57
4.7. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=800$ nm, (b) $d=650$ nm, (c) $d=500$ nm, (d) $d=400$ nm, (d) $d=250$ nm y (e) $d=400$ nm a una longitud de onda de la luz de 1550 nm.	58
4.8. Campo evanescente en una fibra nanométrica de dióxido de silicio, en donde el diámetro es: a) 450 nm, b) 400 nm, c) 300 nm, d) 250 nm, e) 200 nm y f) 150 nm.	60
4.9. Gráfica de parámetros de: dispersión, constante de propagación β , retardo de grupo, velocidad de grupo, pérdidas e índice efectivo, para una micro-nano fibra óptica con un núcleo de dióxido de silicio y como recubrimiento el aire, con un diámetro de 200 nm, variando la longitud de onda de trabajo de 500 a 800 nm	62

4.10. Descripción del entorno gráfico para el análisis modal, vista en dos dimensiones.	63
4.11. Modo fundamental de una fibra nanométrica con un índice de refracción en el núcleo de 1.45 y en el revestimiento un índice de refracción: (a) 1.10, (b) 1.20, (c) 1.25, (d) $n = 1.30$, (e) $n = 1.35$ y (f) $n = 1.38$, a longitud de onda de la luz de $420nm$.	64
4.12. Modo fundamental de una fibra nanométrica con un índice de refracción en el núcleo 1.45 y en el revestimiento un índice de refracción: (a) $n_r = 1.10$, (b) $n_r = 1.20$, (c) $n_r = 1.25$, (d) $n_r = 1.30$, (e) $n_r = 1.35$, (f) $n_r = 1.38$, a longitud de onda de la luz $\lambda = 750nm$.	65
4.13. Vista de una sección transversal de la fibra <i>taper</i> (propagación mediante monitor de película).	67
A.1. Celda unidad Yee [41].	76
A.2. Esquema de un problema de electrodinámica, en donde algunas ondas escapan al infinito.	76
A.3. Esquema de un problema de electrodinámica, con el espacio computacional delimitado por las PML.	77

Índice de tablas

3.1. Propiedades del material de la fibra micro-nanométrica.	41
3.2. Geometría de la guía de onda.	41
3.3. Definición de las propiedades de la región de simulación.	42
3.4. Valores en x,y ; variación de la posición en el eje y con respecto al eje x	44
3.5. Definición de las propiedades de la región de simulación.	46
3.6. Definición de las propiedades de la fuente de incidencia.	47
3.7. Definición de las propiedades del monitor de película.	47
3.8. Definición de las propiedades de las estructuras primitivas.	49
3.9. Definición de las propiedades del parámetro de barrido.	50

A mi madre y mi familia por su entero amor, apoyo y confianza.

Capítulo 1

Introducción

Hace tres décadas el estudio de la materia a nanoescala representaba el inicio de una nueva disciplina, la cual constituye hoy en día un campo de investigación interrelacionado con distintas áreas. El desarrollo de la *nanotecnología* ha tenido un avance impresionante en estos últimos años debido a que se han podido crear, diseñar y manipular componentes y dispositivos a escalas nanométricas, dando lugar a la búsqueda por la comprensión del comportamiento de la luz guiada a esa escala [1].

En 1959 Richard P. Feynman, un especialista en mecánica cuántica, fue el primero en introducir en una conferencia la idea de manipular la materia átomo por átomo. Aunque en ese momento su discurso no tuvo gran repercusión, Feynman, ganador del premio Nobel de Física en 1965, fue un visionario que imaginó un sinfín de aplicaciones tecnológicas manejando objetos a muy pequeña escala. En realidad no fue hasta 1974, que se empleó el término de “nanotecnología” en un artículo titulado “*On the Basic Concept of Nanotechnology*” escrito por el profesor N. Taniguchi de la Universidad de Ciencia de Tokio. El artículo se refería a la nanotecnología como la tecnología con la que se podría manejar, establecer y deformar materiales átomo a átomo, molécula a molécula. Luego de que Taniguchi hiciera mención formal de la nanotecnología, las ideas de Feynman se establecieron en el libro “*Engines of Creation*” publicado por E. Drexler en 1986, en el se hablaba de nanorobots capaces de manipular cada átomo como si fueran ladrillos para ensamblar cualquier otra máquina, incluso describía que podrían construirse o repararse ellos mismos. Drexler imaginó en su libro un mundo a nanoescala, que podría o no hacerse realidad [2].

La nanotecnología consiste en la manipulación de la materia a nivel de moléculas, átomos y fotones. Cuando nos referimos a escalas nanométricas hablamos de dimensiones más pequeñas que un micrómetro, un nanómetro es una billonésima parte de un metro. Para darnos idea, un nanotubo que mide 10 nm de longitud es 1000 veces más pequeño que una fibra monomodo que aproximadamente tiene un diámetro en su núcleo de 10000 nm. Los recientes avances en nanotecnología y la creciente demanda por dispositivos que consuman menos potencia, ocupen menos área, sean más rápidos y tengan mayor sensibilidad han promovido la miniaturización de las fibras ópticas o dispositivos de fibra óptica.

Históricamente, los primeros registros de la luz guiada se dieron en el siglo XIX, cuando Daniel Colladon y John Tyndall llevaron a cabo un experimento en el cual se dirigía la luz por medio de delgadas vigas de agua, confinaron la luz por el principio de reflexión total

interna, debido al cambio de índice de refracción creado en la interfaz agua-aire. Este hecho consolidaría el inicio de la historia de la luz guiada. Ya en 1880, se patentó un invento que consistía en redireccionar y liberar luz empleando lo que se llamó “*Pipe Wheeling*”. No pasó mucho tiempo luego de la invención de Wheeling para que el físico Británico, Charles Vernon Boys, lograra fabricar fibras de vidrio tan delgadas como $1\ \mu\text{m}$, estaban hechas mediante procesos de fundición de algunos minerales. Se trataba del primer registro en el que se hablaban de fibras ópticas con diámetros a micro o nano-escala. Dicha referencia se tomó como punto de partida años más tarde para la posible fabricación de nanofibras ópticas en el “*Art Laboratory*” nombrado así por Richard Threlfall en el libro “*On the Art Laboratory*”. Esto no significó que se tenía todo listo para la transmisión de luz a esa escala, aunque se pudieron aprovechar dichos avances para algunas aplicaciones mecánicas. En 1959 Narinder S. Kapany logró guiar la luz para transmitir imágenes mediante un arreglo de fibras ópticas micro y submicrométricas [1]. Enseguida, en el año de 1960 se inventa el primer láser y seis años después se da muestra de que la alta pureza de la fibra traía como consecuencia menores pérdidas ópticas, esto significaría la consolidación de la fibra óptica en la industria de las comunicaciones ópticas y la demanda enorme de fibra óptica a partir de 1970 [3, 4].

Desde los años 70’s las industrias de fibra óptica, obtuvieron las micro-nanofibras ópticas (conocidas también como fibras *tapers* o cónicas) a partir de la fibra óptica de vidrio convencional, esta última es una guía de onda dieléctrica compuesta por un núcleo cilíndrico hecho de un material con un índice de refracción mayor que el índice de refracción del revestimiento que lo rodea. Según la aplicación las dimensiones de la fibra varían en cuanto al diámetro del núcleo y el revestimiento. Existen medidas estándar de fibra óptica destinada a las comunicaciones, en este caso por ejemplo, las fibras mono-modales tienen dimensiones de $9\ \mu\text{m}$ y $125\ \mu\text{m}$ de diámetro en el núcleo y revestimiento, respectivamente.

El principio de reflexión total interna rige el funcionamiento de las fibras ópticas para conducir la luz a través de la fibra óptica. Si el diámetro de la fibra óptica es mayor que la longitud de onda de luz guiada en la fibra óptica, la luz se confina en el núcleo. Se presenta un fenómeno muy interesante cuando las dimensiones de la fibra óptica se reducen, ya que la luz no solo estará confinada en el núcleo de la fibra óptica, sino que parte del campo envolverá al núcleo de la fibra óptica, esto se hace más notorio cuando las dimensiones del núcleo de la fibra se reducen por debajo de la longitud de onda de la luz que se propaga, provocando que en la interfaz núcleo-revestimiento exista un campo exponencial que decrece, un campo evanescente (este fenómeno se detalla en la sección 2.1.4). Para una fibra óptica que posee un núcleo por debajo de la longitud de onda de la luz que se propaga, es deseable que la diferencia entre los índices de refracción sea alta para tener un mejor confinamiento de la luz. A las fibras ópticas cuyo diámetro es menor que la longitud de onda de la luz guiada a través de ellas, también se les conoce como fibras ópticas nanométricas, micro-nano fibras ópticas, fibras ópticas sublongitud de onda, fibras *taper* o fibras cónicas, alambres sublongitud de onda o micro-nano alambres de fibra. En la presente tesis se empleará de ahora en adelante el nombre de micro-nano fibras ópticas para referirse a guías de onda ópticas con dimensiones nanométricas [5].

Poco antes del siglo XX, J. Bures y R. Ghosh presentaron un trabajo puramente teórico acerca de fibras ópticas sublongitud de onda, en el predecían analíticamente como era posible aumentar la densidad de potencia del campo evanescente en la frontera de la fibra.

En el 2004, Limin Tong, Jingyi Lou y Eric Mazur [6] presentaron un trabajo enfocado al

estudio de guías de onda dieléctricas con dimensiones micro/nanométricas, un año antes ellos mismos en conjunto con otros colaboradores demostrarían la baja pérdida al guiar luz en micro-nano fibras ópticas con diámetros inferiores a la longitud de onda de la luz guiada [7]. En el trabajo presentado en el 2004, ellos registraron un estudio detallado de las propiedades de los modos ópticos guiados a través de alambres sublongitud de onda de silicio y dióxido de silicio. Realizaron un análisis numérico basado en las soluciones exactas de las ecuaciones de Maxwell, pues hasta ese momento las guías de onda con diámetros menores que la longitud de onda de la luz guiada a través de ellas, no se habían abordado adecuadamente (el análisis se presenta en la subsección 2.6.1). En base al estudio analítico que obtuvieron, hicieron uso de un simulador numérico para calcular la fracción de potencia propagada en el núcleo de un alambre sublongitud de onda, y obtuvieron el cálculo de la velocidad de grupo y la dispersión en dichas guías de onda, debido a que son de suma importancia para aplicaciones prácticas, por ejemplo el sensado óptico basado en las ondas evanescentes.

En la figura 1.1, se presenta el perfil de distribución de potencia (conocido como vector de Poynting) en alambres de silicio y dióxido de silicio; la región central que esta mallada representa el perfil de campo propagado dentro del alambre dieléctrico, y el perfil de campo que envuelve la región mallada representa el campo evanescente propagado en el aire.

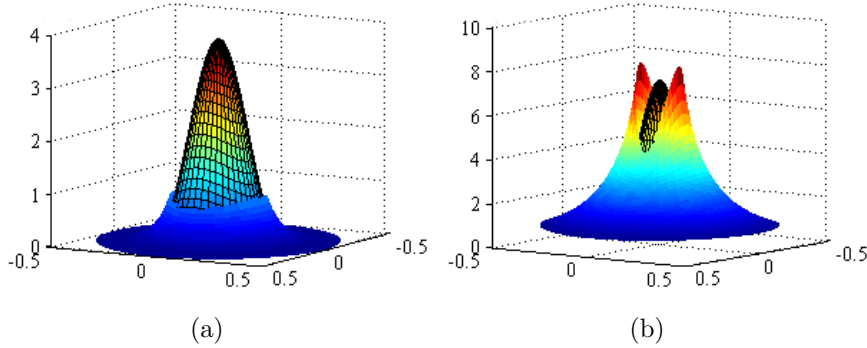


Figura 1.1: Representación (en la dirección z) de la distribución de potencia en alambres de dióxido de silicio a una longitud de onda de la luz de 633 nm con diámetros de (a) 400 nm y (b) 200 nm [6].

Como se observa, en la figura 1.1 (a) un alambre de SiO_2 de 400 nm de diámetro confina la mayor cantidad de potencia dentro del alambre dieléctrico, mientras que en un alambre de 200 nm de diámetro, como se observa en la figura 1.1 (b), existe una gran cantidad de la luz guiada propagada como ondas evanescentes fuera del alambre de SiO_2 . Además de los resultados gráficos obtuvieron mayor información al calcular la fracción de potencia dentro del núcleo, η , y el diámetro efectivo del campo de luz, D_{ef} . Ellos calcularon η (representa el porcentaje de la potencia de luz confinada dentro del núcleo sólido) en función del diámetro del alambre de dióxido de silicio, y obtuvieron la fracción de potencia para el modo fundamental dentro del núcleo de alambres de silicio y SiO_2 , para longitudes de onda de la luz de 633 nm y 1550 nm al variar el diámetro de los alambres dieléctricos de 200 nm a 1550 nm aproximadamente, de dichos resultados se deriva la importancia en aplicaciones como el sensado, debido a la mayor sensibilidad asociada a las ondas evanescentes, y el confinamiento

reducido, que implica mayor densidad en circuitos ópticos integrados, puesto que el silicio y el SiO_2 son los materiales dieléctricos más importantes para la fotónica, optoelectrónica y electrónica.

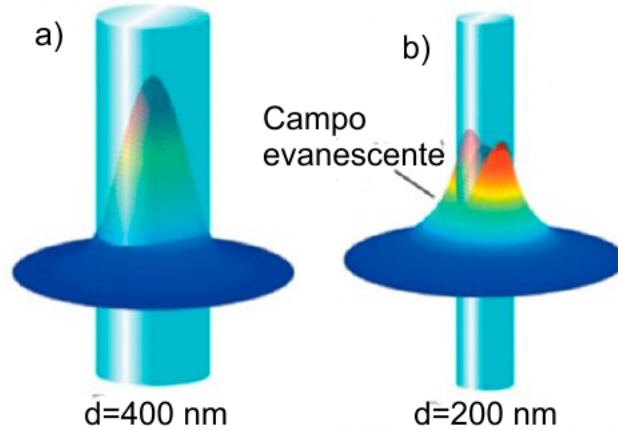


Figura 1.2: Modo fundamental de una fibra micro-nanométrica con una longitud de onda de la luz $\lambda=633$ nm y el diámetro de la fibra (a) $d=400$ nm, (b) $d=200$ nm [8].

Un conjunto de trabajos continuaron con esa línea de investigación, y para el año 2012, Pinghui y Zhangrong [8] presentan una revisión de las propiedades y aplicaciones de las fibras ópticas micro-nanométricas, en particular analizan la propagación de la luz en una fibra dieléctrica de perfil escalonado, la cual posee un núcleo más pequeño que la longitud de onda de la luz confinada en la fibra. En la figura 1.2 se muestran los resultados numéricos que obtuvieron, en los cuales se compara el modo fundamental en una fibra micro-nanométrica cuando se varía el diámetro del núcleo. Ellos muestran en la figura 1.2 (a) y (b) como el diámetro decrece más allá de la longitud de onda de la luz y como es que incrementa la cantidad de energía propagada como ondas evanescentes a medida que se reduce el diámetro de la fibra.

En ese mismo año, Limin Tong (autor del libro *Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Fibers* publicado en 2010) et al. publicaron un tutorial de las micro-nano fibras ópticas, en el que hacen una revisión de las propiedades ópticas, así como de las técnicas de fabricación de las micro-nano fibras hasta ese momento registradas, así como del gran campo de aplicaciones asociado a este tipo de guías de onda.

En el año 2013, Xiaoquin Wu y Limin Tong [9] publican un artículo en el que enfatizan el hecho de que la tecnología de fibra óptica en combinación con el desarrollo de nanotecnología ha dado lugar a la creación de las micro-nano fibras ópticas, lo que representa una novedosa plataforma que actualmente permite explorar la tecnología de fibra óptica a pequeña escala. En dicho artículo ellos realizan una revisión introductoria de la fabricación, caracterización y aplicaciones de las micro-nano fibras ópticas, principalmente en el progreso que se ha tenido en cuanto al grupo de investigación de los mismos autores. De la revisión general ellos obtienen los modos guiados en una micro-nano fibra mediante un simulador numérico. En la figura 1.3 se muestra la distribución de potencia para el modo fundamental en una fibra de

dióxido de silicio con diámetros de 800 nm, 400 nm y 200 nm, mediante una perspectiva de dos dimensiones (2D), figura 1.3 (a), (b) y (c) y tres dimensiones (3D), figura 1.3 (d), (e), (f) y (g) respectivamente, como puede apreciarse, mientras que una micro-nano fibra óptica de 800 nm de diámetro confina la mayor cantidad de energía dentro de la fibra, una micro-nano fibra de 200 nm de diámetro guía fuera de la fibra una gran cantidad de la energía (> 90%) manifestándose como ondas evanescentes. De los resultados realizados analíticamente concluyen que cuando el diámetro de una fibra óptica es reducido hasta cierto valor ($d=457$ nm a una longitud de onda de la luz guiada de 633 nm), solo el modo fundamental existe (HE_{11}). Generalmente cuando el diámetro es mucho más pequeño que la longitud de onda de operación, una micro-nano fibra con un bajo índice de refracción en el revestimiento (por ejemplo, aire) presenta propiedades únicas como los intensos campos evanescentes como fueron descritos antes en la figura 1.3.

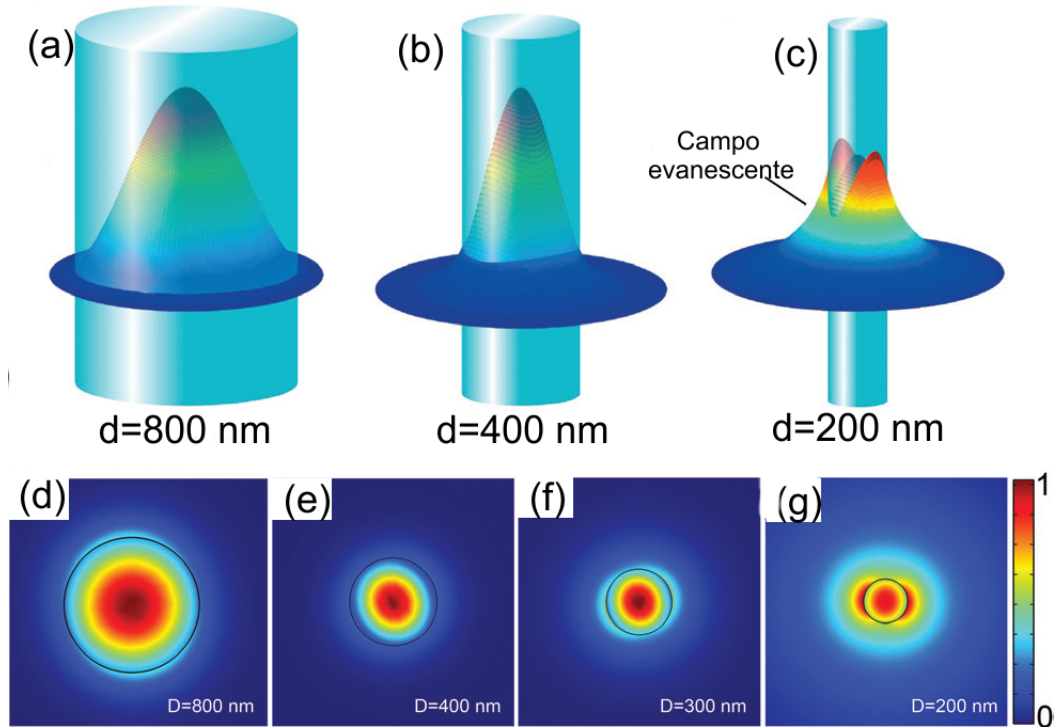


Figura 1.3: Distribución de potencia en micro-nano fibras de dióxido de silicio para una longitud de onda de la luz guiada de 633 nm con diámetros de la fibra de (a) 800 nm, (b) 400 nm y (c) 200 nm en una perspectiva 3D, y (d) 800 nm, (e) 400 nm, (f) 300 nm y (g) 200 nm en una perspectiva 2D [9].

En el 2013, George Y. Chen y colaboradores [10] presentaron una recopilación de los avances más representativos de la tecnología de sensado a base de micro-nano fibras ópticas, de tal revisión destacan la potencialidad que ofrecen las propiedades de las micro-nano fibras ópticas, en particular muestran la dependencia de la fracción de potencia propagada como campo evanescente (denotada como η_{EF}) en función de λ/r , ellos se basan en los resultados

registrados en el 2003 por Limin Tong y otros co-autores [1]. Además resulta interesante las variaciones que realizan en el índice de refracción del revestimiento de la micro-nano fibra de dióxido de silicio, esto se visualiza en la figura 1.4, donde se muestra la dependencia de η_{EF} en función de λ/r para una micro-nano fibra de dióxido de silicio. Por ejemplo, cuando el medio que rodea a la micro-nano fibra de SiO_2 es el aire, η_{EF} es 0.5 cuando $\lambda/r \sim 4$, lo que significa que la mitad de la potencia se esta propagando fuera de la micro-nano fibra cuando su radio es un cuarto de la longitud de onda de la luz que se propaga en esta. Se observa que η_{EF} aumenta cuando los índices de refracción del revestimiento de la micro-nano fibra incrementan, cuando λ/r se mantiene constante.

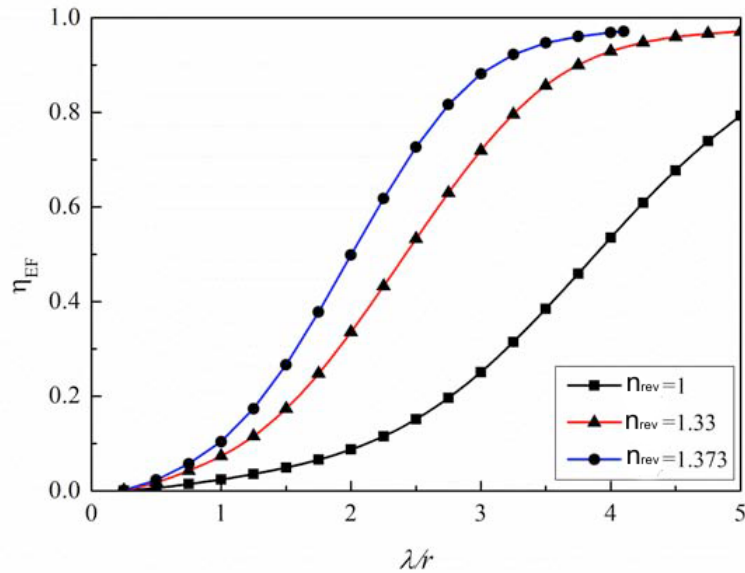


Figura 1.4: Dependencia de la fracción de potencia propagada como campo evanescente η_{EF} en función de la longitud de onda normalizada λ/r con diferentes índices de refracción del revestimiento [10].

Uno de los más recientes artículos reportados en la literatura acerca de la tecnología de sensado a base de microfibras ópticas, fue publicado en el 2014 por Jingyi Lou, Yipei Wang y Limin Tong [11], ellos hacen un recuento de los más recientes progresos en cuanto a la tecnología de sensores de microfibras ópticas, específicamente realizan un repaso de las técnicas de fabricación de las microfibras, propiedades de las guías de onda y aplicaciones de sensado. Hacen una recopilación de las propiedades de guiado óptico en guías de onda sublongitud de onda y respaldan los resultados analíticos anteriormente derivados por otros autores mediante el uso de simuladores numéricos.

Los recientes avances en simuladores numéricos para el diseño de dispositivos fotónicos permiten el futuro desarrollo de prototipos experimentales. La motivación por el estudio y fabricación de fibras ópticas sublongitud de onda es la creación de bloques y sistemas a escala micro o nanométrica, así como el desarrollo de componentes o dispositivos fotónicos y

herramientas ópticas miniaturizados para aplicaciones tecnológicas [1, 5].

La fabricación de fibras ópticas micro-nanométricas implica una etapa de diseño, desarrollo del prototipo y experimentación. La etapa de diseño involucra analizar el sistema, modelando la solución; el modelo es el vehículo que se utiliza para experimentar sustituyendo al sistema real. Los experimentos pueden llegar a tener un alto grado de complejidad y sofisticación, lo que requerirá de técnicas especializadas en cuanto al diseño de experimentos se refiere. En la mayor parte de los casos, los experimentos de simulación juegan un papel importante. La simulación se considera una técnica experimental para la resolución de problemas, lo que lleva a la necesidad de realizar múltiples ejecuciones para entender como se comporta el sistema. Por tanto, una simulación debe planificarse como una serie de experimentos; los cuales deben diseñarse de acuerdo a las especificaciones deseadas para que se puedan obtener resultados significativos que ilustren datos que sean de interés.

Por tanto, la simulación por computadora es una herramienta que nos permite realizar experimentos mediante un software especializado en base a un modelo de un sistema dado. Se construye el modelo y se experimenta con él mediante la simulación, obteniendo resultados en menor tiempo y con menores recursos. En la fase de diseño, el diseñador debe tomar todas las condiciones necesarias que emulen el sistema propuesto, el diseño se traduce entonces al sistema que se quiere analizar.

Se ha considerado hasta el momento el rol que juega la simulación, pero de manera específica, la simulación por computadora representa una herramienta poderosa que es imprescindible cuando nos enfrentamos al modelado de problemas con características muy específicas, que no tienen solución analítica o resulta muy complicado obtener la solución numérica. Las dificultades para hallar la solución analítica del problema planteado pueden solventarse relativamente fácil mediante la simulación por computadora, con esto obtenemos soluciones muy aproximadas.

Aunque mediante la simulación no se pueden resolver todo tipo de problemas, los avances continuos en entornos de programación y software han promovido el desarrollo de simuladores especializados en distintas áreas, convirtiendo a la simulación por computadora en una herramienta muy poderosa, pues como se mencionó antes, el esfuerzo y el consumo de recursos es menor, nos permite crear un entorno que reproduce las condiciones experimentales del sistema físico real otorgando mayor control del sistema, en muchos casos, cuando se habla de diseño, es posible garantizar que los resultados de la simulación respaldan la futura y correcta implementación del sistema. Recientemente la simulación por computadora se ha convertido en un procedimiento adecuado, confiable y muy útil en el análisis, diseño e implementación de futuros sistemas, sin dejar a un lado el desarrollo analítico y la experimentación [12].

La simulación por computadora en esta época ya no es una herramienta útil solo en manufactura o en la industria tecnológica, sino que es parte importante en la formación académica, como una herramienta formativa indispensable en muchas áreas como: la ciencia, la tecnología, el diseño, entre otras [13].

El estudio de estructuras a escala nanométrica ha sido tal, que se puede trabajar a nivel simulación mediante software especializados enfocados en áreas como la óptica, la fotónica, el diseño electrónico, entre otras. Por esto, se han creado diversas herramientas numéricas que resuelven el problema mediante distintos métodos, son capaces de analizar y diseñar estructuras en tiempos relativamente cortos con resultados de gran precisión, entregándonos parámetros de nuestro interés. Algunos paquetes computacionales que son empleados en el

ámbito académico y de investigación son: Matlab conocido como el lenguaje de la computación técnica, es un lenguaje de alto nivel de computación tecnológica que nos proporciona herramientas útiles en diversas disciplinas como el procesamiento de señales y de imágenes. Comsol Multiphysics (antes conocido como Femlab) es un paquete de software de modelado y análisis para el prototipo virtual de fenómenos físicos. Lumerical un paquete computacional que emplea herramientas especializadas en el área de fotónica [14–16].

Este último es el recurso computacional especializado en fotónica, por lo que Lumerical representa en esta tesis la herramienta especializada para el estudio de estructuras a nanoescala, pues contiene un solucionador de las ecuaciones de Maxwell en tres dimensiones (3D), permitiendo calcular a detalle geometrías de guía de onda arbitrarias, guías de onda de fibra tradicionales y guías de onda planas, hasta dispositivos más complejos que incluyen guías de onda de plasmones superficiales, fibras de cristal fotónico y especialmente en arreglos de guías de onda en donde varían los índices de refracción. Esto permite a ingenieros, investigadores y científicos centrarse en la innovación de nuevos conceptos de diseño de guías de onda, mientras se respaldan en la exactitud de los resultados de las simulaciones [14].

Lumerical posee una herramienta para el análisis de guías de onda ópticas arbitrarias, este es el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD, por sus siglas en inglés) se ha hecho muy popular y es utilizado ampliamente en el campo de la fotónica [17–21], específicamente, nos permite estudiar la propagación de los plasmones superficiales en guías de onda longitudinales, en guías de onda formadas por capas de metal-dieléctrico-metal o guías de onda de silicio sobre aislante (SOI). Es un método que implica la solución de las ecuaciones de Maxwell en geometrías complejas, presentando una solución directa en el espacio y tiempo, lo que significa que los campos electromagnéticos se resuelven en función del tiempo, aplicable a diversos problemas de electromagnetismo y fotónica. En general, este algoritmo computacional se utiliza para calcular los campos electromagnéticos como una función de la frecuencia o longitud de onda mediante la realización de transformadas de Fourier durante la simulación, esto permite obtener campos de valores complejos y otras magnitudes derivadas tales como el vector de Poynting complejo, transmisión normalizada, y las proyecciones de campo lejano como función de la frecuencia o longitud de onda. La información de campo se puede devolver en dos diferentes estados de normalización. En este entorno se puede especificar y agregar el tipo de materiales empleados, ya sea de índice de refracción dispersivos (n, k) como función de la longitud de onda o se pueden utilizar modelos teóricos tales como: plasma (Drude), Debye, Lorentz, etc [3]. Para establecer las condiciones de contorno del problema analizado para hallar la solución específica, esta técnica de simulación nos proporciona condiciones de frontera tales como: capas de acoplamiento perfecto (PML, por sus siglas en inglés) [22], metal, periódica o Bloch. Es compatible con diferentes tipos de fuentes como: dipolos puntuales, fuentes gaussianas, fuentes de ondas planas, fuentes de campo-total campo-dispersivo (TFSF, por sus siglas en inglés), o fuentes importadas para interactuar con programas de diseño fotónicos externos [14].

La presente tesis consiste en el análisis de la propagación de la luz (del rango visible) en guías de onda con dimensiones nanométricas, dicho estudio se basa en la simulación de dispositivos ópticos mediante dos herramientas computacionales de Lumerical. El estudio de fibras taper, fibras convencionales a nivel simulación representa un campo de estudio del que actualmente se hace una gran parte de la investigación de la que se desprenden un gran número de aplicaciones en diferentes áreas.

1.1. Objetivos

El objetivo general de esta Tesis es:

- Realizar el análisis de la propagación de ondas de baja dimensión (ondas ópticas 2D) en guías de onda sublongitud de onda empleando el paquete computacional Lumerical.

Los objetivos específicos se definen a continuación:

- Realizar una investigación de la teoría referente a la propagación de las ondas de baja dimensión en estructuras de dimensiones nanométricas.
- Identificar las distintas herramientas que Lumerical utiliza para el estudio de la propagación de ondas de baja dimensión.
- Realizar un análisis de la propagación de ondas de baja dimensión en configuraciones de guías de onda, con el fin de validar los resultados posteriores.
- Analizar los parámetros de propagación, tales como intensidad, longitud de onda, transmitividad y reflexión, en función de las características físicas de la estructura.
- Discutir los resultados obtenidos y proponer posibles aplicaciones para estos.

1.2. Descripción de la tesis

La presente tesis esta dividida en cuatro capítulos. En el capítulo 2 se hace una descripción teórica acerca de los fenómenos de propagación de la luz, se define que es una guía de onda enfocándose en la fibra óptica, y se resuelven analíticamente los modos de propagación en una guía de onda cilíndrica.

En el capítulo 3 se hace una descripción detallada del paquete computacional Lumerical, así como de las herramientas de simulación que se emplearon para analizar la propagación en estructuras nanométricas.

Por último en el capítulo 4 se hace un análisis de los resultados obtenidos para derivar las respectivas conclusiones.

Capítulo 2

Fundamentos electromagnéticos

En este capítulo se describen teóricamente los conceptos que se citarán a lo largo del desarrollo de la tesis. Se empieza por analizar el movimiento ondulatorio y los fenómenos de propagación con los que estamos familiarizados, como la transmisión, reflexión y refracción de la luz. Se define lo que es una guía de onda y los tipos de guías de ondas que son de nuestro especial interés. Por último, se obtienen los modos electromagnéticos en una guía de onda cilíndrica, lo que permitirá entender y analizar como se propaga la energía electromagnética en dichas guías de ondas.

2.1. Propagación de ondas

Se sabe que una onda es una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo, que es autónoma del medio y transporta energía [23]. Atendiendo el aspecto fundamental que tiene la onda de propagarse, las ondas pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, y se definen así por las direcciones en que se puede propagar la onda.

Un tipo de onda particular es la *onda plana*, se presenta cuando todos los frentes de onda forman un conjunto de planos perpendiculares a la dirección de propagación. Algo interesante de este tipo de onda es que puede viajar en el espacio sin cambiar su perfil, es decir, depende de una sola coordenada.

La ecuación diferencial de onda tridimensional se define como:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}. \quad (2.1)$$

La ecuación de onda definida en la ecuación 2.1 es una ecuación diferencial de segundo orden en derivadas parciales, en las variables espaciales y temporal, nos proporciona la información que nos interesa de una onda, es decir nos describe como se *propaga la onda*.

2.1.1. Reflexión y refracción

Se describen brevemente los fenómenos de propagación de las ondas de luz mediante el modelo ondulatorio y a través de una perspectiva más específica. Empleamos el concepto de rayo como una herramienta matemática solo para facilitar la visualización de la progresión

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS

2.1. PROPAGACIÓN DE ONDAS

de la luz correspondiente a la dirección del flujo de la energía radiante, sin embargo no se hace a un lado el concepto físico de onda.

Cuando una onda incide en la interfaz entre dos medios diferentes, parte de la energía radiante se refleja y/o parte se transmite o refracta. La **ley de reflexión** nos dice que el ángulo reflejado es igual al ángulo de incidencia $\theta_i = \theta_r$, donde θ_i es el ángulo de incidencia y θ_r es el ángulo reflejado. En el mismo plano de incidencia se encuentra el rayo incidente, el rayo reflejado y la perpendicular a la superficie.

$$n_i \text{sen} \theta_i = n_t \text{sen} \theta_t. \quad (2.2)$$

Si se tienen dos medios con índices de refracción distintos n_i y n_t (donde los subíndices i y t representan los índices de refracción del medio incidente y del medio transmisor respectivamente), y una onda incide en la interfaz entre los dos medios, la onda se va hacia adelante, doblándose y desviando su trayectoria, se dice entonces que la onda se refracta, este fenómeno se describe mediante la **ley de Snell** enunciada en la ecuación 2.2, donde θ_i es el ángulo de incidencia y θ_t es el ángulo de transmisión o de refracción, dicha relación nos describe como cambia la velocidad a la que se mueve la onda al cruzar la interfaz entre un medio y otro (estableciendo el índice de refracción como medida de la velocidad de la luz). En la figura 2.1 se muestra la representación del fenómeno de reflexión y refracción de un haz de luz no polarizada.

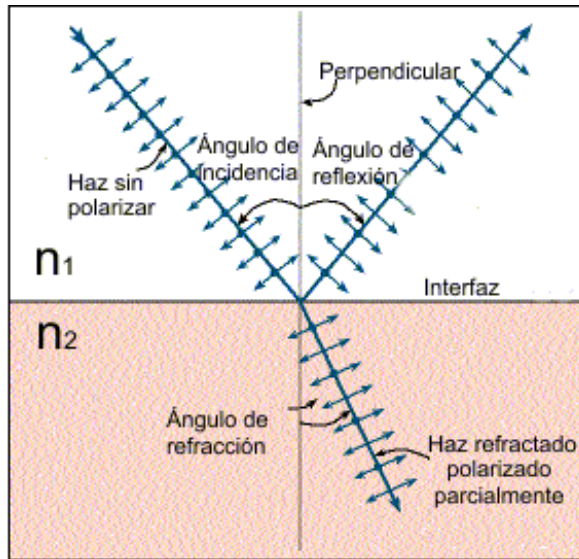


Figura 2.1: (a) Rayos incidente, transmitido y reflejado.

Cuando inicialmente la luz esta viajando en un medio ópticamente menos denso, es decir si $n_i < n_t$, entonces de la ecuación 2.2 (Ley de Snell) $\text{sen} \theta_i > \text{sen} \theta_t$, debido a que la función es la misma, tomando valores positivos en el rango de 0° a 90° , entonces la relación anterior queda expresada como $\theta_i > \theta_t$. El rayo se desvía acercándose a la normal cuando pasa hacia un medio con mayor índice de refracción, en caso opuesto, el rayo se dobla alejándose de la normal cuando entra hacia un medio con menor índice de refracción. Estas manifestaciones

de la propagación de la luz a nivel macroscópico se derivan naturalmente de interacciones submicroscópicas. La ley de Snell es una consecuencia de la teoría electromagnética [23].

2.1.2. Ondas electromagnéticas en una interfaz

Los fenómenos de propagación descritos en la sección 2.1.1 se derivan de la naturaleza de la ondas y de que cumplan las debidas condiciones de frontera. Sin embargo, es conveniente analizar otra perspectiva, ya que propiedades como la intensidad radiante de reflexión y refracción o los cambios de fase y polarización se describen completamente a partir de la naturaleza de los campos electromagnéticos y sus condiciones de contorno.

De la figura 2.2 podemos establecer que el plano z paralelo a la interfaz separa los dos medios con índices de refracción n_i y n_t . Estos índices de refracción pueden expresarse en términos de permeabilidad y permitividad μ_i, ϵ_i y μ_t, ϵ_t con respecto a n_i y n_t respectivamente, de esta manera los índices de refracción se pueden definir como: $n_i = \sqrt{\mu_i \epsilon_i / \mu_0 \epsilon_0}$ y $n_t = \sqrt{\mu_t \epsilon_t / \mu_0 \epsilon_0}$.

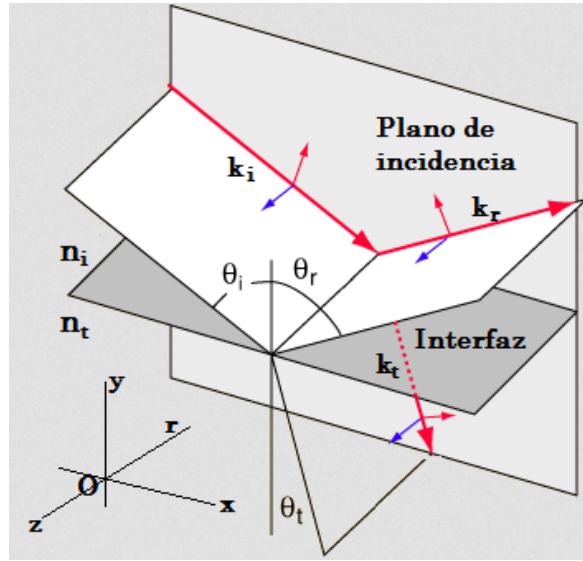


Figura 2.2: Ondas planas incidentes en la frontera entre dos medios.

Describimos una onda plana con vector de onda \mathbf{k} y frecuencia ω que incide en la interfaz entre dos medios de índices n_i y n_t . La onda plana incidente se expresa como:

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_{0i} \cos(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} - \omega_i t), \quad (2.3)$$

De la ecuación 2.3, E_{0i} es la amplitud del campo eléctrico incidente, si E_{0i} es constante en el tiempo (linealmente polarizado) y \mathbf{r} es el vector que expresa la unidad normal. Definimos las ondas reflejadas y transmitidas como:

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_{0r} \cos(\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r} - \omega_r t + \epsilon_r), \quad (2.4)$$

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{0t} \cos(\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} - \omega_t t + \epsilon_t). \quad (2.5)$$

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS

2.1. PROPAGACIÓN DE ONDAS

La magnitud del número de onda $|\mathbf{k}|$ se expresa como:

$$|\mathbf{k}_i| = |\mathbf{k}_r| = k_i = \omega\sqrt{\mu_i\epsilon_i}, \quad (2.6)$$

$$|\mathbf{k}_t| = k_t = \omega\sqrt{\mu_t\epsilon_t}. \quad (2.7)$$

Como se observa en 2.4 y 2.5 se introducen las constantes de fase ϵ_r y ϵ_t como una constante relativa a \mathbf{E}_i porque la posición en el origen no es única.

El establecimiento de las condiciones que deben cumplir los campos, son conocidas como **condiciones de frontera**. En particular se debe cumplir que la componente del campo \mathbf{E} tangencial a la interfaz sea continua a través de él, lo mismo se espera para \mathbf{H} , es decir la componente total del campo tangencial \mathbf{E} debe ser igual en los dos lados de la interfaz [23].

Las condiciones de frontera para $z = 0$, implican que la variación de los todos los campos debe ser la misma para $z = 0$, en este caso debemos tener la misma fase para todos los factores para $z = 0$.

$$(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r})_{z=0} = (\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r})_{z=0} = (\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r})_{z=0}. \quad (2.8)$$

Podemos visualizar de la ecuación 2.8 que los tres vectores deben estar en el mismo plano de incidencia. De esta forma:

$$k_i \text{sen}\theta_i = k_r \text{sen}\theta_r = k_t \text{sen}\theta_t. \quad (2.9)$$

Dado que $k_i = k_r$, deducimos que $\theta_i = \theta_r$, es decir, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, observamos que se trata de *la ley de reflexión* definida con anterioridad. En tanto que *la ley de Snell* se define como:

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_t} = \frac{k_r}{k_t} = \sqrt{\frac{\mu_t\epsilon_t}{\mu_i\epsilon_i}} = \frac{n_t}{n_i}. \quad (2.10)$$

Considerando la simplicidad de una onda plana polarizada que incide sobre la interfaz entre dos medios transparentes con propiedades físicas diferentes. La fracción de luz reflejada depende del ángulo de incidencia, de la dirección del vector del campo eléctrico y del índice de refracción [24]. Se describen a continuación los resultados del cálculo de la intensidad de reflexión y refracción en base a la teoría electromagnética.

Si la luz incidente es polarizada con \mathbf{E} paralelo al plano de incidencia, entonces:

$$r_{\parallel} = \frac{\mathbf{E}_{0r}}{\mathbf{E}_{0i}} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad \text{reflectividad.} \quad (2.11)$$

$$t_{\parallel} = \frac{\mathbf{E}_{0t}}{\mathbf{E}_{0i}} = \frac{2\text{sen}\theta_t\cos\theta_i}{\text{sen}(\theta_i + \theta_t)\cos(\theta_i - \theta_t)} \quad \text{amplitud transmitiva.} \quad (2.12)$$

Si la luz incidente es polarizada con \mathbf{E} perpendicular al plano de incidencia, entonces:

$$r_{\perp} = \frac{\mathbf{E}_{0r}}{\mathbf{E}_{0i}} = \frac{-\text{sen}(\theta_i - \theta_t)}{\text{sen}(\theta_i + \theta_t)} \quad \text{reflectividad.} \quad (2.13)$$

$$t_{\perp} = \frac{\mathbf{E}_{0t}}{\mathbf{E}_{0i}} = \frac{2\text{sen}\theta_i\cos\theta_t}{\text{sen}(\theta_i + \theta_t)} \quad \text{amplitud transmitiva.} \quad (2.14)$$

Las relaciones 2.11-2.14 están relacionadas con las direcciones específicas de los campos, son conocidas como las *Ecuaciones de Fresnel* y son válidas para cualquier medio homogéneo, isótropico y lineal.

2.1.3. Reflexión total interna

En 1854 John Tyndall en conjunto con Daniel Collandon realizaron un experimento que les permitiría confinar la luz por el principio de reflexión total interna. Una vez dados a conocer estos resultados comenzaría la historia de la luz guiada. Años más tarde, la tecnología de las comunicaciones ópticas avanzaría enormemente puesto que se aprovecharía el fenómeno de reflexión total interna para confinar la luz en las fibras ópticas.

En base a lo expuesto en la subsección 2.1.1, el fenómeno de reflexión interna se presenta bajo ciertas condiciones cuando la luz viaja inicialmente de un medio ópticamente más denso a uno menos denso, es decir, cuando $n_i > n_t$. Introducimos la definición de **ángulo crítico**, θ_c , como aquel valor del ángulo de incidencia para el cual $\theta_t = \pi/2$ ó $\theta_t = 90^\circ$, es decir la reflexión total. Retomando esto, analizaremos una situación interesante; si una fuente esta sumergida en un medio ópticamente denso, y hacemos que el ángulo de incidencia, θ_i , aumente paulatinamente. Según la ley de Snell:

$$\text{sen}\theta_i = \frac{n_t}{n_i} \text{sen}\theta_t. \quad (2.15)$$

Entonces $\theta_t > \theta_i$. Como inicialmente la fuente se encuentra en un medio ópticamente denso, $n_i > n_t$, entonces la relación n_t/n_i será menor que 1, reescribiendo $n_{it} < 1$. Se puede apreciar en la figura 2.3, que al aumentar el ángulo de incidencia, θ_i , el rayo transmitido se acerca poco a poco a la tangencia con la interfaz, la energía del rayo reflejado *internamente* es mayor conforme θ_i aumenta.

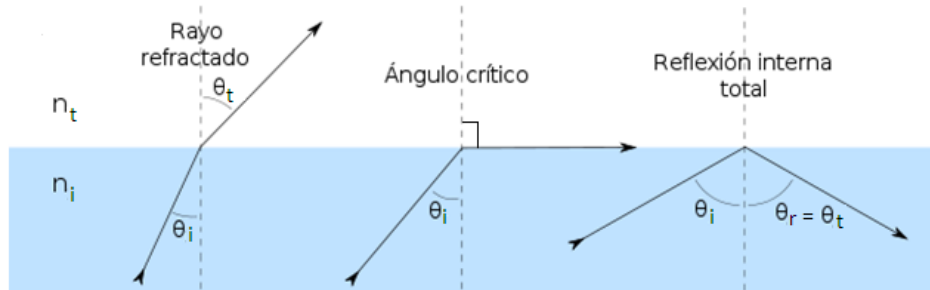


Figura 2.3: Reflexión interna.

Así como se aprecia en la figura 2.3 si el ángulo $\theta_t = 90^\circ$, como $\text{sen}90^\circ = 1$, entonces:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_t}{n_i}. \quad (2.16)$$

De la ecuación 2.16 podemos visualizar que para ángulos iguales o mayores que el ángulo crítico, θ_c , toda la energía incidente se refleja totalmente en el medio de índice de refracción n_i , este proceso se conoce como *reflexión total interna*.

2.1.4. Ondas evanescentes

En la sección 2.1.1 se expusieron los fenómenos de propagación a nivel macroscópico, sin embargo la luz tiene un comportamiento muy diferente a escala nanométrica, cuando

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS

2.1. PROPAGACIÓN DE ONDAS

se trabaja con dispositivos de tales dimensiones, ya no es preciso decir que la luz viaja en línea recta entre espacios tan reducidos, esto representa un desafío para el desarrollo de tecnologías fotónicas u ópticas encargadas de la implementación y construcción de dispositivos a nanoescala. Ciertamente a escala nanométrica la energía se puede producir por fotones radiados entre dos superficies en las que la separación no es más que unos cuantos nanómetros, distancias más pequeñas que la longitud de onda de luz. Con dicha separación entre ambas superficies la longitud de onda de la luz se interrumpe produciendo lo que se conoce como el fenómeno de ondas evanescentes. Este fenómeno se presenta comúnmente en las fibras ópticas, en este tipo de guías de onda el campo evanescente tienen mayor intensidad cuando se reducen las dimensiones de la fibra, más preciso, cuando se reduce el diámetro del núcleo de la fibra por debajo de la longitud de onda de la luz que se propaga en ella [1]. Vamos a analizar con más detalle el fenómeno de ondas evanescentes en una fibra óptica .

Se observa en la figura 2.4 una fibra óptica estándar mono-modal. Una fibra óptica destinada a las comunicaciones ópticas, típicamente tiene un núcleo y revestimiento de $9 \mu m$ y $125 \mu m$ respectivamente. En la figura 2.4(a), se representa mediante óptica de rayos, como la luz conducida a través de la fibra se confina en el núcleo de la fibra por reflexión total interna. En la figura 2.4(b), se presenta como se confina la luz en una fibra con un diámetro más pequeño comparado con el de la figura 2.4(a).

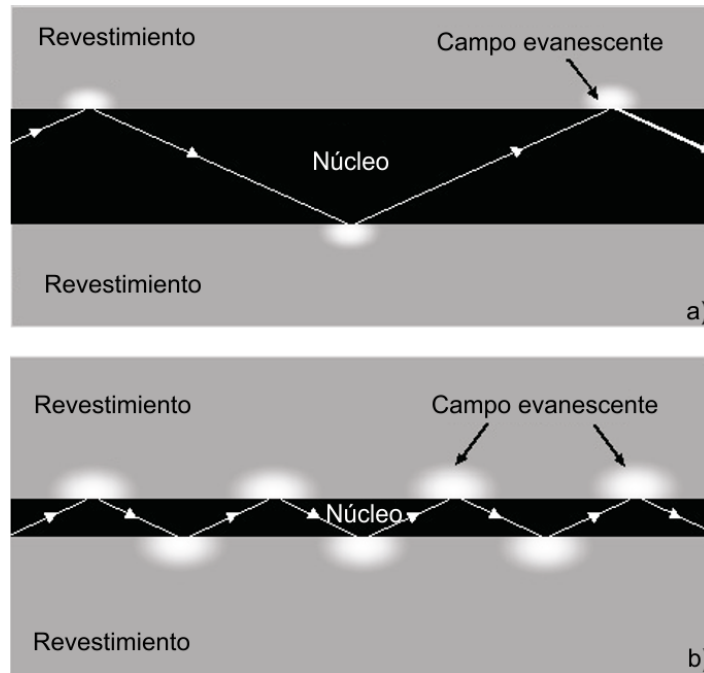


Figura 2.4: Guía de onda óptica en la que se representa el confinamiento de la luz por reflexión total interna con un diámetro en el núcleo (a) relativamente grande (b) relativamente pequeño [1].

Como se observa en las figura 2.4 (a), un fenómeno importante se presenta cuando el rayo óptico se refleja en la frontera del núcleo de mayor índice de refracción, cierta fracción de luz penetra en la interfaz, propagándose como un *campo evanescente* en el revestimiento,

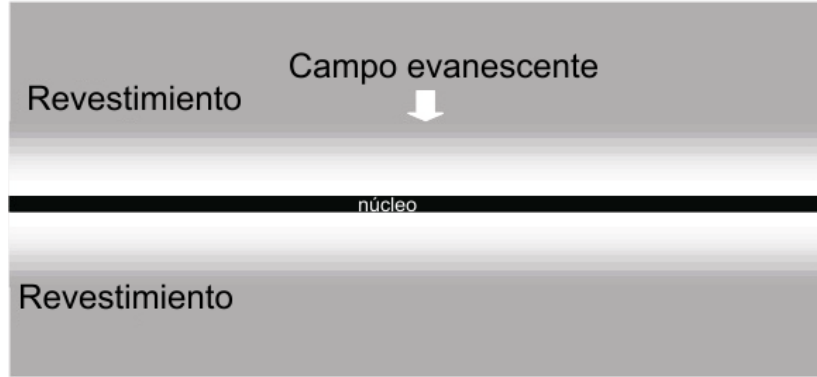


Figura 2.5: Guiado óptico en una micro o nanofibra con diámetros en el núcleo menores que la longitud de onda de la luz que se propaga [1].

al regresar nuevamente al núcleo, se presenta un ligero cambio en la dirección de su eje. Si el diámetro de la fibra es más pequeño (figura 2.4(b)), la luz incide en la frontera con mayor frecuencia, en este caso aumenta la probabilidad de propagación fuera del núcleo (propagándose en la interfaz como ondas evanescentes).

Si el diámetro del núcleo de la fibra es menor que la longitud de onda de la luz que se propaga en está, como se aprecia en la figura 2.5, la cantidad de potencia que se propaga fuera del núcleo es significativa. En este caso, el diámetro del núcleo de la fibra no es lo suficientemente grande para generar un campo electromagnético de estado estable debido a la interferencia creada al reflejarse los rayos de luz, lo que significa que la teoría de rayos ópticos ya no aplica, ahora tratamos con campos electromagnéticos.

Dejaremos de lado la teoría óptica de rayos y pasaremos al concepto de campos electromagnéticos. Sabemos que se produce reflexión total interna, cuando una onda que viaja a través de un medio con índice de refracción n_2 se encuentra con un medio con índice de refracción menor n_1 , si dicha onda penetra con un ángulo igual o mayor que el ángulo crítico se presenta reflexión total en el medio n_1 . Esto hecho no impone que el campo en la interfaz sea distinto de cero, pues en este caso, la onda que se propagaba en el medio n_1 no esperaba encontrarse con un medio n_2 , como lo definen las leyes electromagnéticas, el campo en la interfaz no puede ser cero, y tampoco puede transmitirse. Para que no haya contradicciones la única respuesta es que el campo se atenúe en el medio con índice de refracción n_2 , la forma de la ecuación de onda definida como una función exponencial con exponente complejo (como se describe en la ecuación 2.17), es ahora un exponencial negativo (ecuación 2.26), formándose en la interfaz lo que se conoce como **ondas evanescentes**. El campo es evanescente puesto que tiende a desaparecer [26].

Visualizaremos matemáticamente el decaimiento exponencial de una onda evanescente. La función de onda del campo eléctrico transmitido según la solución de las ecuaciones de Maxwell (como ha analizado en la subsección 2.1.2) en un medio con índice de refracción n_t está definida como:

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{0t} e^{i(\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} - \omega t)}. \quad (2.17)$$

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS

2.1. PROPAGACIÓN DE ONDAS

De la ecuación 2.17 desarrollamos el producto interno $\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r}$, de manera que:

$$\mathbf{r} = xi + j. \quad (2.18)$$

Entonces el producto interno es:

$$\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} = k_t \text{sen}\theta_t x - k_t \text{cos}\theta_t y. \quad (2.19)$$

En donde $\theta_i = \theta_t$ y θ_t es el ángulo de refracción, denotado con el subíndice t por el hecho de que se trata de la onda transmitida. Cabe mencionar que la notación es la misma que se ha venido utilizando desde la subsección 2.1.2.

De la ecuación 2.19 expresamos $\text{cos}\theta_t$ en términos de $\text{sen}\theta_i$, para ello se emplea la identidad trigonométrica $\text{cos}^2\theta + \text{sen}^2\theta = 1$, entonces en función del ángulo θ_t :

$$\text{cos}^2\theta_t + \text{sen}^2\theta_t = 1. \quad (2.20)$$

Haciendo uso de la ley de Snell para expresar $\text{sen}\theta_t$ en función de $\text{sen}\theta_i$. De la ley de Snell tenemos:

$$\frac{n_t}{n_i} = n = \frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_t} \Rightarrow \text{sen}\theta_t = \frac{\text{sen}\theta_i}{n}. \quad (2.21)$$

Del resultado obtenido en la ecuación 2.21, la ecuación 2.20 se escribe como:

$$\begin{aligned} \text{cos}^2\theta_t + \frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} = 1 &\Rightarrow \text{cos}^2\theta_t = 1 - \frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} \Rightarrow \text{cos}^2\theta_t = (-1) \left(\frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} - 1 \right), \\ \text{cos}\theta_t = (-1)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} &\Rightarrow \text{cos}\theta_t = i \left(\frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Del resultado anterior, la ecuación 2.19 queda expresada como:

$$\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} = k_t \text{sen}\theta_t x - k_t i \left(\frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} y. \quad (2.23)$$

De manera que sustituyendo la ecuación 2.23 en la ecuación 2.17 tenemos:

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{0t} e^{i \left[k_t \text{sen}\theta_t x - k_t i \left(\frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} y - \omega t \right]}. \quad (2.24)$$

Podemos reescribir la ecuación anterior si definimos:

$$k_t i \left(\frac{\text{sen}^2\theta_i}{n^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} = \alpha. \quad (2.25)$$

Entonces sustituyendo la ecuación 2.25 en 2.24, considerando la multiplicación de números complejos y el hecho de que y es negativa en la región que estamos considerando, tenemos:

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{0t} e^{-\alpha|y|} e^{i[k_t \text{sen}\theta_t x - \omega t]}. \quad (2.26)$$

Como podemos observar la ecuación 2.26 es la representación matemática de una onda evanescente. Podemos apreciar que el argumento de la segunda exponencial que contiene el término k_t indica que la onda electromagnética se está moviendo en la dirección x paralela al contorno, aunque la amplitud decrece exponencialmente con respecto a la posición en el medio con el índice de refracción más pequeño [25].

La existencia de ondas evanescentes implica que ahora no solo un medio con índice de refracción n_1 propagará a la onda, sino que también hay que considerar el campo propagado en el medio con índice de refracción n_2 [26]. Y la presencia de campo evanescente asociado a la propagación de luz en la fibra óptica, se convierte en una de las cosas más sorprendentes en el estudio de este tipo de guías de onda.

2.2. Guías de onda ópticas

Un medio para guiar energía electromagnética (EM) puede ser una línea de transmisión o una guía de onda, aunque en principio están destinadas para guiar de un punto a otro energía EM, existen entre ambas algunas diferencias [27]. Una línea de transmisión solo soporta modos electromagnéticos transversales (MET), mientras que una guía de onda puede guiar una diversidad de configuraciones de un campo. Además una línea de transmisión pierde eficiencia cuando se trabaja en el rango de frecuencias de microondas, debido entre otras cosas a la pérdida en el dieléctrico, por otro lado, una guía de ondas no puede transmitir desde una frecuencia igual a 0 o frecuencias de cd, puesto que solo opera a una determinada frecuencia conocida como frecuencia de corte [28]. En esta tesis, nos interesa trabajar con frecuencias del rango visible hasta el infrarrojo.

Las guías de onda ópticas desempeñan un papel importante en la fotónica pues como se mencionó antes, la razón es simple, una guía de onda conduce la luz de un punto de excitación a un punto de detección, de manera que presenten muy pocas pérdidas. Hoy día, la óptica guiada forma parte de áreas como: las telecomunicaciones, el sensado, las fuentes láseres, entre otras.

Una guía de onda puede tener una estructura transversal arbitraria pero continua, por ejemplo, guías de onda circulares y rectangulares como se observan en la figura 2.6, en este apartado se hará una descripción general de las guías de onda que son objeto de estudio en este trabajo, tal es el caso de guías de onda circulares, dicha base teórica sustenta el desarrollo experimental presentado en el capítulo 3.

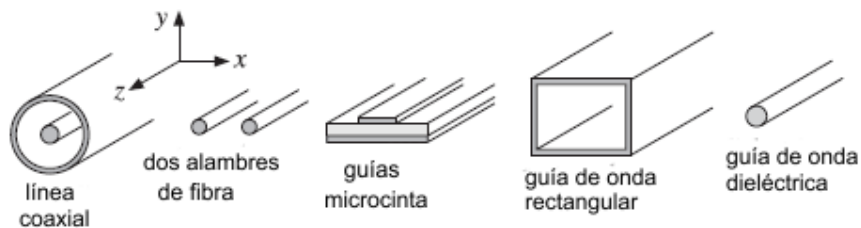


Figura 2.6: Guías de onda típicas.

2.2.1. Guías de onda slab

Tanto las guías de onda “*slab*” (estructura plana) como las guías de onda rectangulares representan guías de onda planares, son elementos clave en la construcción de circuitos ópticos integrados y láseres semiconductores [29].

Las guías de onda “*slab*” representan las guías de onda ópticas más simples. Debido a lo simple de su geometría la descripción de los modos guiados y radiados puede ser descrita matemáticamente de una manera muy sencilla. Por tanto el estudio de las propiedades de este tipo de guías de onda resulta útil para el análisis de guías de onda de geometría más compleja. Además suelen ser utilizadas para guiar la luz en dispositivos ópticos [30].

La figura 2.7 muestra esquemáticamente una guía de onda “*slab*”, como se observa, entre dos materiales con índices de refracción n_c y n_s se encuentra el substrato central n_f , que regularmente tiene un espesor h inferior al de los substratos adyacentes. El índice de refracción de la capa superior n_c puede ser unitario si la región por encima de la parte central es aire, o puede tener algún otro valor si la región central esta rodeada por materiales dieléctricos. Para confinar los modos guiados es necesario que el índice de refracción n_f sea mayor que n_c y n_s [30, 31].

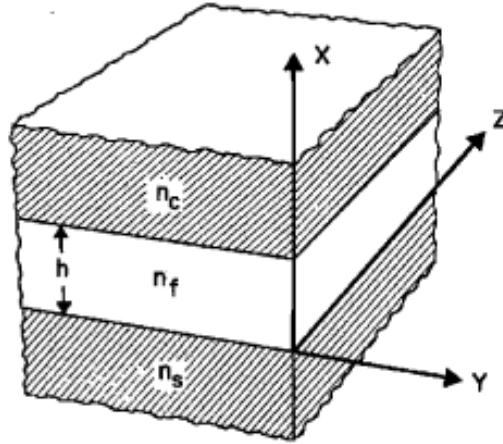


Figura 2.7: Guía de onda “*slab*”[29].

Si la guía de onda “*slab*” es dieléctrica, entonces soporta un número finito de modos guiados que son clasificados en modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM). Para los modos TE tenemos que:

$$H_y = E_x = E_z = 0, \quad (2.27)$$

Y para los modos TM:

$$E_y = H_x = H_z = 0. \quad (2.28)$$

A su vez los modos guiados TE y TEM son complementados por un número continuo infinito de modos radiados no guiados [29, 30].

Las guías de onda “*slab*” pueden ser: guías de salto índice, guías de índice gradual y guías multicapas. Las guías de onda de salto índice y de índice gradual se caracterizan por la forma

en como varia el índice de refracción entre la capa central y las regiones adyacentes, por otro lado, una guía de onda multicapa esta compuesta por más de tres capas y son empleadas para una variedad de propósitos. Las guías multicapas son usadas para realizar aproximaciones de perfil de índice gradual [32].

2.2.2. Guías de onda rectangulares

Generalmente, las guías de onda rectangulares consisten en un núcleo cuadrado o rectangular. Es común que la región que rodea al núcleo de la guía de onda rectangular sea aire [29].

Las guías de onda rectangulares se utilizan en gran medida en óptica integrada y en circuitos optoelectrónicos.

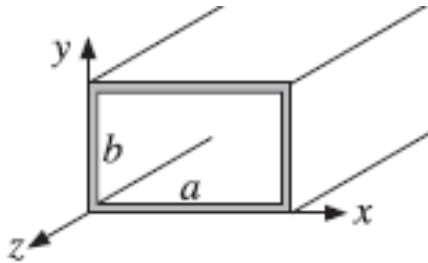


Figura 2.8: Geometría de una guía de onda rectangular [27].

La solución analítica de las guías de onda rectangulares no ha sido desarrollada, excepto para el perfil parabólico en dos dimensiones (2D). Puesto que el análisis en tres dimensiones (3D) es indispensable para el estudio de las características de transmisión en estas guías de onda, es común el uso de simuladores numéricos para abordar el problema y hallar la solución analítica de los modos guiados, o también se emplean métodos de aproximación, por ejemplo el método del índice efectivo [29, 30].

La geometría de una guía de onda rectangular se presenta en la figura 2.8. Por convención, la dirección de propagación es a través del eje z . La guía mide de ancho a a lo largo del eje x , y en el eje y su altura se denota como b . La geometría de la guía de onda rectangular consta de un par de paredes conductoras horizontales (a lo largo del x) y un par de paredes verticales (a lo largo del eje y) las cuales forman una frontera continua. Esta guía de onda solo puede propagar modos TE y TM, eso es porque se trata de una guía de onda rectangular que tiene una frontera conductora que envuelve por completo al plano transversal, es decir, no puede guiar modos TEM puesto que cualquier campo eléctrico debe tener un campo tangencial que sea cero en la frontera, lo que significa que no es posible establecer un campo eléctrico que no exhiba la variación lateral que se necesita para cumplir esta condición de frontera [33, 34].

2.2.3. Guías de onda cilíndricas

Una guía de onda cilíndrica es un conductor circular tubular. Una onda plana propagándose a través de la guía de onda cilíndrica resulta en un modo TE o TM.

Las guías de onda cilíndricas, como se ilustra en la figura 2.2.3, confinan la luz en dos dimensiones, (x,y) . Su representación principal son las fibras ópticas circulares, que son usadas para la transmisión de información a grandes distancias, y su canal guiado se emplea en el uso de dispositivos ópticos. Entraremos de lleno a describir este tipo especial de guía de onda circular, la fibra óptica.

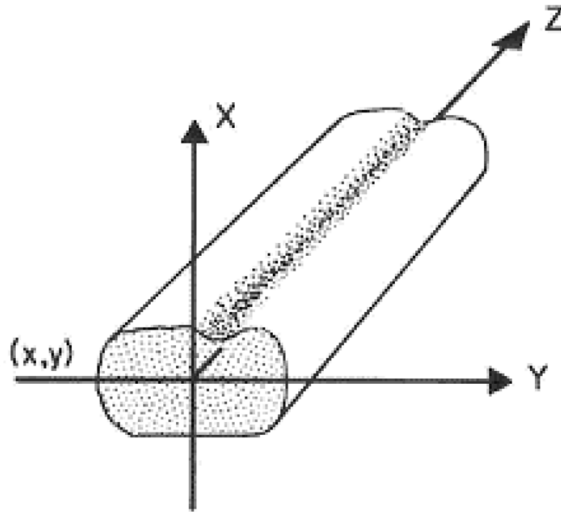


Figura 2.9: Guía de onda cilíndrica [29].

2.3. Fibras ópticas

En 1854 se dio a conocer el fenómeno de reflexión total interna que rige el principio de funcionamiento de las fibras ópticas [3]. A pesar de que las primeras fibras de vidrio fueron hechas en 1920, no fue hasta 1970 que la demanda por el uso de fibra óptica creció enormemente [35].

La **fibra óptica** es una guía de onda dieléctrica de estructura cilíndrica, hecha principalmente de algún tipo de vidrio o plástico, sus características físicas permiten que sean muy extensas (hasta cientos de kilómetros con muy pocas pérdidas) y comparadas con otras, éstas son flexibles [36].

2.3.1. Diseño de las fibras ópticas

Una fibra óptica convencional consiste de un núcleo cilíndrico hecho de un material (silicio puro o SiO_2) con índice de refracción n_1 , el cual está rodeado por un revestimiento hecho de un material con un índice de refracción n_2 menor que el índice de refracción del núcleo (Germanio, Aluminio o Silicio dopado), $n_1 > n_2$, como se muestra en la figura 2.10 [36]. Debido a que la fibra está compuesta por dos materiales con índice de refracción distintos, en este caso, el índice de refracción del núcleo es mayor que el del recubrimiento, se cumple que si el ángulo de incidencia es mayor o igual que el ángulo crítico θ_c , la luz se confina en el núcleo por el principio de reflexión total interna.

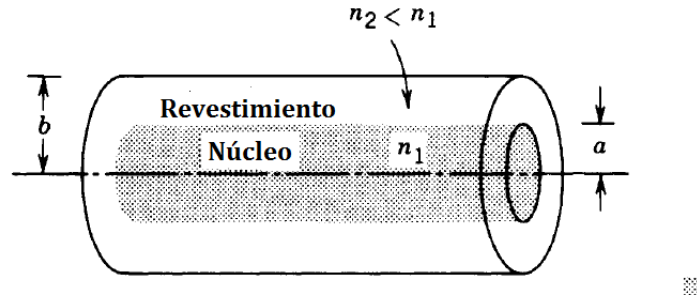


Figura 2.10: La fibra óptica es una guía de onda cilíndrica.

A continuación se definen los tipos de fibra óptica más comunes, y se describen algunos principios básicos indispensables en el estudio de la fibra óptica.

2.4. Clasificación de la fibras ópticas

En guías de onda cilíndricas la luz se propaga en forma de modos. Cada modo viaja en el eje de la guía de onda con diferente velocidad de grupo y constante de propagación, conservando su distribución espacial transversal y su estado de polarización. Cuando el diámetro del núcleo de la fibra óptica es lo suficientemente pequeño, solo es posible confinar un modo, se habla entonces de una **fibra monomodal**, como se muestra en la figura 2.11. Las fibras que pueden propagar diverso número de modos se llaman **fibras multimodales**, figura 2.12, el diámetro del núcleo de dichas guías es mayor comparado con el diámetro del núcleo de las fibras monomodales [37].

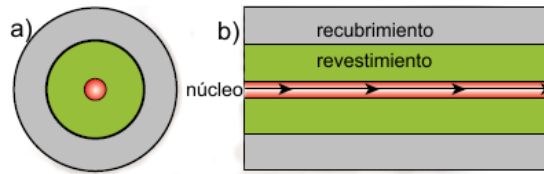


Figura 2.11: Fibra óptica monomodal a) vista frontal, b) vista transversal [38].

Las fibras multimodales permiten diferentes modos de propagación, una desventaja asociada a éstas es la diferencia entre la velocidad de grupo de cada modo, es decir, el tiempo de viaje entre cada modo es diferente puesto que cada modo toma una trayectoria distinta para viajar a través de la fibra, este efecto se denomina *dispersión modal* [35]. Existe entonces un límite de tiempo entre cada pulso de luz que se envía a través de la fibra, de esta manera se asegura que no haya un empalme entre cada modo, en comunicaciones este parámetro es de gran interés, ya que representa la velocidad a la cual puede operar un sistema de fibra óptica [3, 35].

La dispersión modal puede ser reducida si se hace un cambio gradual en el índice de refracción, desde un valor máximo en el centro del núcleo hasta un valor mínimo llegando a la frontera núcleo-revestimiento. Este tipo de fibras son llamadas **fibras de índice gradual**, en

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS
2.4. CLASIFICACIÓN DE LA FIBRAS ÓPTICAS

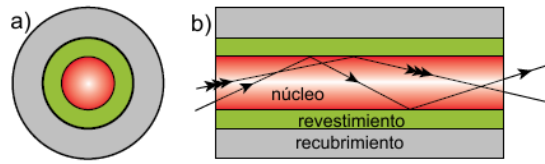


Figura 2.12: Fibra óptica multimodal a) vista frontal, b) vista transversal [38]. [38].

cambio las fibras convencionales formadas por un núcleo y revestimiento, cada uno compuesta de un material con índice de refracción constante, se denominan **fibras de índice escalonado**. Por lo anterior, la principal clasificación de las fibras ópticas depende de su geometría o del perfil de índice de refracción, en esta clasificación se conocen: *las fibras monomodales*, *las fibras multimodales*, *las fibras de índice gradual* y *las fibras de índice escalonado*. Como se observa en la figura 2.13, hay fibras que pueden presentar propiedades conjuntas de la clasificación anterior para optimizar alguna característica en particular.

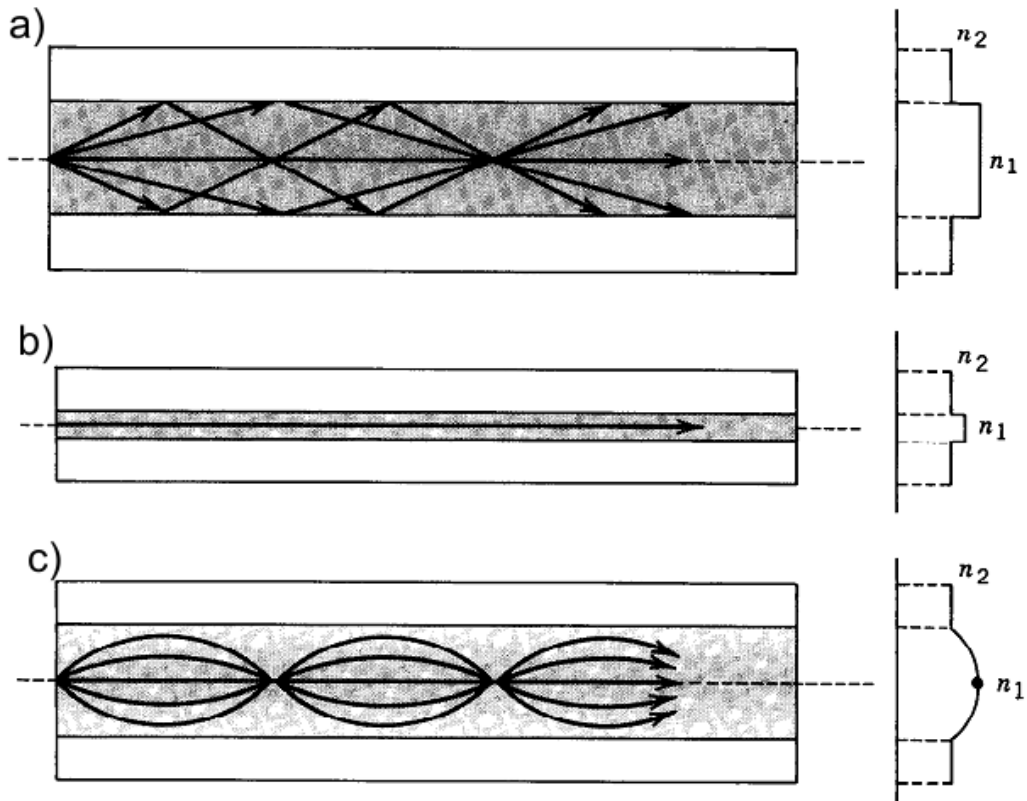


Figura 2.13: Tipos comunes de fibra óptica: a) fibra multimodo de índice escalonado b) fibra monomodo de índice escalonado y c) fibra multimodo de índice gradual [37].

2.4.1. Fibras monomodo

Las fibras monomodales tienen la capacidad de confinar un solo modo a través del eje del núcleo de la fibra. Algunas características de las fibras monomodales son:

- El diámetro del núcleo de la fibra es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de las señales ópticas que transmiten.
- Mayor ancho de banda.
- Las medidas del núcleo de la fibra y revestimiento son de $9 \mu m$ y $125 \mu m$ respectivamente.

2.4.2. Fibras de índice escalonado

Las fibras de índice escalonado confinan la luz por el principio de reflexión total interna debido a que se trata de una fibra con índice de refracción en el núcleo, n_1 , mayor que el índice de refracción del recubrimiento n_2 , como se aprecia en la figura 2.14.

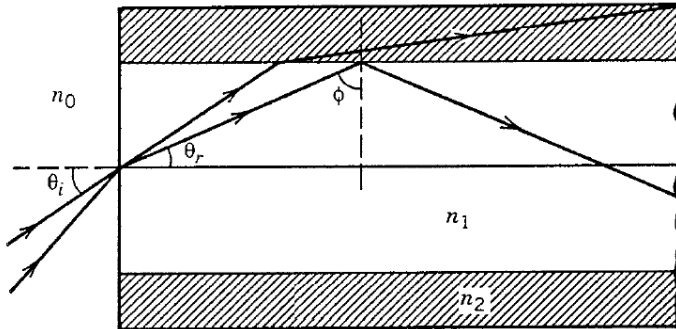


Figura 2.14: Confinamiento de la luz por reflexión total interna, cuando el ángulo de incidencia es mayor que el θ_c [3].

2.4.3. Fibras de índice gradual

Las fibras de índice gradual no poseen un núcleo con un índice de refracción constante, su nombre se debe a que el índice de refracción del centro del núcleo de la fibra n_1 , decrece de manera gradual hasta alcanzar un valor mínimo, n_2 , en la frontera con el recubrimiento. Este tipo de fibras comúnmente se modela bajo un régimen de decaimiento cuadrático, en este sentido se hace uso del perfil $-\alpha$, descrito de la forma:

$$n(\rho) = \begin{cases} n_1[1 - \Delta(\rho/a)]^\alpha, & \rho < a \\ n_1(1 - \Delta) = n_2, & \rho \geq a, \end{cases} \quad (2.29)$$

Donde el parámetro ρ es la distancia radial del rayo desde el eje de la fibra, α define el perfil de índice y a el radio del núcleo de la fibra. Por ejemplo, en las fibras de índice parabólico,

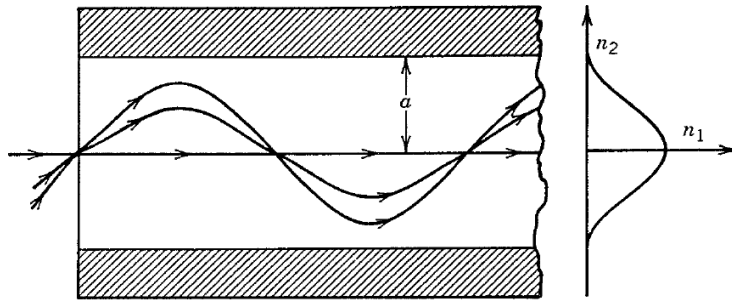


Figura 2.15: Trayectoria de los rayos en una fibra de índice gradual [3].

$\alpha = 2$, en cambio, el perfil de las fibras de salto índice se aproxima al límite cuando aumenta α .

De la figura 2.15 podemos observar la trayectoria de 3 rayos que inciden en el núcleo de la fibra óptica de índice gradual. El camino más largo está dado por la trayectoria de los rayos oblicuos, y la velocidad del rayo varía a través de su trayectoria por los cambios paulatinos del índice de refracción. Como se observa, el rayo que viaja en el eje del núcleo de la fibra toma el camino más corto, sin embargo viaja más lento debido a que es el mayor índice de refracción se encuentra en el eje de la fibra. Por otro lado, los rayos oblicuos que toman la trayectoria más larga viajan más rápido conforme el índice de refracción en el núcleo disminuye. Entonces, es posible que todos los rayos lleguen al mismo tiempo al otro extremo de la fibra debido al cambio gradual del índice de refracción [3].

2.4.4. Características de transmisión en las fibras ópticas

- La pérdida modal en función de longitud de onda λ (medido en unidades de propagación como dB/cm).
- El índice de grupo; nos indica la relación de la velocidad de la luz con respecto a la velocidad de grupo, c/v_g .
- La *velocidad de grupo* se define matemáticamente como $v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$, se interpreta como la velocidad a la que el pico de un impulso temporal se propagará en ausencia de las no linealidades, en otras palabras, es la velocidad a la cual la energía de un modo en particular se propaga a través de la fibra.
- Dispersión; definida como la tasa de cambio del retardo de grupo con respecto a la longitud de onda λ , definida como $\frac{dt}{d\lambda}$. La cantidad de dispersión en una guía de onda depende del diseño de la fibra, ya que la constante de propagación β es función de a/λ (donde a es el radio de la fibra). En este caso las dimensiones de la fibra son inferiores que la longitud de la onda propagada λ .
- La *constante de propagación* β se define como $\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{l_0}$, donde n_{eff} es el índice efectivo, y l_0 es la longitud de onda en el espacio libre.

2.5. Modos ópticos en una guía de onda circular

Se ha revisado que una guía de onda es un elemento que permite confinar y propagar una onda electromagnética. A las soluciones estacionarias, es decir, a todas las configuraciones posibles de campo electromagnético que soporta una guía de onda se le conoce como modos. En otras palabras, un modo óptico se define en base a solución específica de la ecuación de onda que satisface determinadas condiciones de contorno y tiene la propiedad de que las soluciones espaciales del campo electromagnético no cambian con el tiempo [3]. En la sección 2.2 se definió lo que era una línea de transmisión así como una guía de ondas, las primeras pueden ser descritas a partir de las soluciones cuasi-estacionarias. Por otro lado, para describir el comportamiento electromagnético en una guía de onda se parte de las ecuaciones de campo de Maxwell, de las que se desprende la ecuación de onda. Es así que los modos electromagnéticos pueden predecirse y cuantificarse resolviendo dichas ecuaciones para las condiciones de frontera y condiciones iniciales establecidas. Es decir, la propagación ya no dependerá únicamente de una sola coordenada cuando se imponen límites en la frontera o condiciones de contorno, debido a que podrán existir otras posibilidades, como que el campo eléctrico o magnético (o ambos) estén en la dirección de propagación.

Se denomina modo transversal electromagnético (TEM) al caso en el que el campo \mathbf{E} y \mathbf{B} son transversales a la dirección de propagación. Cuando solo el campo eléctrico es transversal a la dirección de propagación se habla de modo TE, y cuando el campo magnético es transversal a la dirección de propagación se trata de modo TM. Es preciso mencionar que las soluciones modales de cualquier tipo de propagación resultan de superponer un modo TE y un modo TM. Además a continuación podrá verificarse que en una guía de onda cilíndrica no pueden existir modos TEM debido a que no esta compuesta por al menos dos conductores.

2.5.1. Ecuaciones de Maxwell

Para entender el mecanismo de propagación de la potencia óptica en una fibra, es necesario resolver las ecuaciones de Maxwell sujetas a las condiciones de contorno cilíndricas de la fibra óptica.

En esta subsección se hace un estudio de la propagación de la luz en fibras ópticas circulares, describiendo a continuación la ecuación de onda a partir de las ecuaciones de Maxwell.

El análisis de guías de onda ópticas involucra un estudio de teoría electromagnética. Es a partir de las ecuaciones de Maxwell que podemos estudiar la propagación de ondas electromagnéticas, éstas ecuaciones nos describen el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos debido a que relacionan el campo eléctrico y magnético.

Para medios isótropos (el medio se comporta de la misma forma en cualquier dirección), no magnéticos y sin carga libre, las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo se expresan como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad , \quad (2.30)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad , \quad (2.31)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad , \quad (2.32)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad . \quad (2.33)$$

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS
2.5. MODOS ÓPTICOS EN UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR

Donde:

- E**=La intensidad del campo eléctrico
- H**=La intensidad del campo magnético
- D**=La densidad del flujo eléctrico
- B**=La densidad del flujo magnético

Además para las cuatro ecuaciones de Maxwell, las características del medio en el cual el campo existe es necesario especificar el flujo en términos de campos en un medio específico. Las relaciones constitutivas son:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (2.34)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (2.35)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0, \quad (2.36)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0. \quad (2.37)$$

La ecuación de onda de los campos electromagnéticos se puede derivar de las ecuaciones de Maxwell. Empleando la ecuación 2.30 y 2.31 se obtiene

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = -\varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}. \quad (2.38)$$

Si se utiliza el vector identidad: $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$, se tiene

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}. \quad (2.39)$$

Haciendo uso de la ecuación 2.32, la cuál se puede expresar en términos de **E** como $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, la ecuación se reduce a $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla^2 \mathbf{E}$, de esta forma la ecuación 2.38 queda expresada como:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (2.40)$$

De forma similar puede obtenerse y demostrarse que de la ecuación 2.31, se obtiene

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (2.41)$$

Las ecuaciones 2.40 y 2.41 son conocidas como ecuaciones de onda, y ∇^2 es el operador Laplaciano. Para coordenadas cilíndricas y polares, las ecuaciones de onda 2.40 y 2.41 se mantienen para cada componente del campo vectorial, cada componente satisface la ecuación de onda escalar:

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0. \quad (2.42)$$

Donde Ψ puede representar el componente del campo **E** o **H** y v es la velocidad de fase (velocidad de propagación de un punto de fase constante en la onda) en el medio dieléctrico. Se define como:

$$v = \frac{1}{(\mu \varepsilon)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{(\mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.43)$$

Donde:

- μ_r =Es la permeabilidad relativa.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS

2.5. MODOS ÓPTICOS EN UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR

μ_0 =Es la permeabilidad en el vacío.

ϵ_r =Es la constante dieléctrica relativa.

ϵ_0 =Es la permitividad eléctrica en el vacío.

La solución básica de la ecuación de onda es una onda sinusoidal, la forma más importante es una onda plana dada como:

$$\Psi = \Psi_0 e^{j(\omega t - \beta z)}. \quad (2.44)$$

Con $\beta = \frac{\omega}{v}$ Por lo tanto, para las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético:

$$(2.45)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\epsilon \mu_0} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 n_{eff}} = k_0 n_{eff}. \quad (2.46)$$

2.5.2. Ecuaciones de Maxwell para una fibra óptica de índice escalonado

Dada la simetría cilíndrica de una fibra óptica se emplearán coordenadas cilíndricas (figura 2.16) para estudiar dicha guía de onda cilíndrica, aunque esto signifique complicar los cálculos dado que las relaciones vectoriales son complejas. Sin embargo, resolver las ecuaciones de Maxwell para una simetría cilíndrica en coordenadas cartesianas acoplaría diferentes componentes, de manera que las ecuaciones resultantes serían aún más complejas.

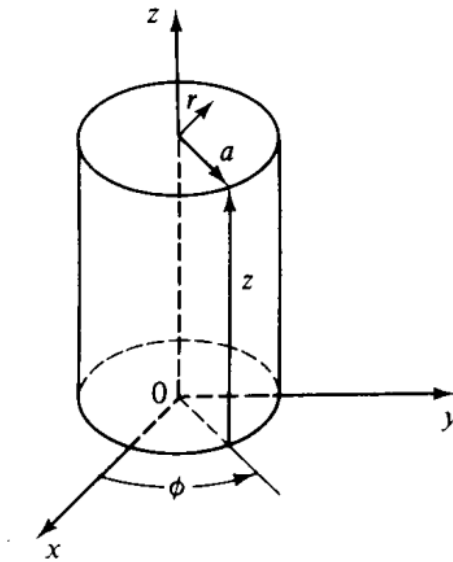


Figura 2.16: Coordenadas cilíndricas.

Se supone el análisis en una fibra de índice escalonado (el cambio de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento es abrupto). Se solucionarán parcialmente las ecuaciones de Maxwell en el núcleo y revestimiento de la fibra, para después aplicar las condiciones de contorno. De las ecuaciones obtenidas, se calcularán las características de los modos de propagación.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS
2.5. MODOS ÓPTICOS EN UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR

Es atinado el empleo de coordenadas cilíndricas para el análisis de la fibra óptica puesto que las soluciones de las ecuaciones son separables en cada variable de dos regiones de la fibra óptica. Es decir, cada una de las soluciones de la ecuación de ondas anteriores se expresa como:

$$A_i = CF_i(r)F_2(\phi)F_3(z)F_4(t). \quad (2.47)$$

Donde A_i es cada una de las incógnitas que deben resolverse:

$$E_r, E_\phi, E_z, H_r, H_\phi, H_z. \quad (2.48)$$

Aunque basta con resolver dos de ellas, debido a que las ecuaciones de Maxwell permiten relacionarlas con las demás. Primero se calcula E_z y H_z .

Si se opera sobre las ecuaciones de Maxwell se puede encontrar que las componentes E_z y H_z del campo electromagnético cumplen la siguiente ecuación de ondas en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left(q^2 - \frac{\nu^2}{r^2} E_z \right) = 0, \quad \text{campo eléctrico} \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \left(q^2 - \frac{\nu^2}{r^2} H_z \right) = 0, \quad \text{campo magnético} \quad (2.50)$$

Es decir,

$$\frac{d^2 F_1(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF_1(r)}{dr} + \left(q^2 - \frac{\nu^2}{r^2} F_1(r) \right) = 0. \quad (2.51)$$

Debido a que se estudia una guía bidimensional, las dos componentes E_z y H_z no son completamente independientes, sino que las condiciones de contorno acoplan dos componentes, en este caso las componentes tangenciales son:

$$E_z(r \leq a)|_{r=a} = E_z(r \geq a)|_{r=a}, \quad (2.52)$$

$$E_\phi(r \leq a)|_{r=a} = E_\phi(r \geq a)|_{r=a}, \quad (2.53)$$

$$H_z(r \leq a)|_{r=a} = H_z(r \geq a)|_{r=a}, \quad (2.54)$$

$$H_\phi(r \leq a)|_{r=a} = H_\phi(r \geq a)|_{r=a}. \quad (2.55)$$

2.5.3. Solución de la ecuación de onda

Reproduciendo la ecuación 2.51:

$$\frac{d^2 F_1(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF_1(r)}{dr} + \left(q^2 - \frac{\nu^2}{r^2} F_1(r) \right) = 0, \quad (2.56)$$

Donde el parámetro q^2 estaba definido como:

$$q^2 = \varpi^2 \mu \varepsilon - \beta^2. \quad (2.57)$$

Las ecuaciones con esta estructura se denominan ecuaciones diferenciales de Bessel de orden ν y dependen del valor de q^2 .

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS
2.5. MODOS ÓPTICOS EN UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR

2.5.4. Solución de la ecuación de onda en el núcleo

La condición impuesta a la constante de propagación en la fibra óptica para que los modos ópticos de propagación se guíen en la fibra, es la siguiente:

$$n_2 k = k_2 \leq \beta \leq k_1 = n_1 k. \quad (2.58)$$

Por otra parte, según la ecuación 2.57 el valor de q en el núcleo de la fibra (q_{nucleo}) esta dado como:

$$q_{nucleo}^2 = k_1^2 - \beta^2. \quad (2.59)$$

Y de acuerdo con la ecuación 2.58, $q_{nucleo}^2 > 0$. Si $q_1 = \sqrt{q_{nucleo}^2}$, entonces la ecuación diferencial de Bessel 2.56 es:

$$F_1(r) = C_1 J_\nu(q_1 r) + C_2 Y_\nu(q_1 r). \quad (2.60)$$

Donde C_1 y C_2 son constantes y $J_\nu(x)$ y $Y_\nu(x)$ son funciones de Bessel de primera y segunda especie respectivamente.

Las soluciones radiales dependen del orden ν . Debido a que viene dada por un número entero, la solución de la ecuación de Helmholtz no es única, y existen infinitas soluciones, cada una de las cuales dan lugar a un patrón de campo electromagnético transversal a la dirección de propagación z , el cuál viene caracterizado por una variación radial y azimutal diferente. A cada uno de esos patrones es a lo que se denomina *modo*.

En cuanto a los campos en el núcleo de la fibra, $r \leq a$, hay que considerar su comportamiento en las inmediaciones de su eje, es decir cuando $r \rightarrow 0$. Comprobando la forma de las funciones de Bessel, $C_2 = 0$, ya que la función $Y_\nu(x)$ diverge cuando r tiende a 0.

2.5.5. Solución de la ecuación de onda en el revestimiento

En este caso, según la ecuación 2.57 el valor de q en el revestimiento de la fibra ($q_{revestimiento}$) viene dado por:

$$q_{revestimiento}^2 = k_1^2 - \beta^2. \quad (2.61)$$

Y de acuerdo con la ecuación 2.58, $q_{revestimiento}^2 < 0$. Si $q_2 = \sqrt{-q_{revestimiento}^2}$, entonces la solución a la ecuación diferencial de Bessel 2.56 fuera del núcleo de la fibra es:

$$G_1(r) = C_3 I_\nu(q_2 r) + C_4 K_\nu(q_2 r). \quad (2.62)$$

Donde C_3 y C_4 son constantes y $I_\nu(x)$ y $K_\nu(x)$ son funciones modificadas de Bessel de primera y segunda especie respectivamente.

Si se requiere que la señal propagada esté confinada en el núcleo, entonces los campos han de ser rápidamente decrecientes o evanescentes en el revestimiento. Existe una función de Bessel que presenta tal comportamiento, dicha función es $K_\nu(x)$. Forzosamente C_3 ha de ser 0, ya que la función $I_\nu(x)$ es decreciente con x .

La ecuación de onda para los campos eléctrico y magnético es:

$$E_z(r, \phi, z, t) = r \leq a \rightarrow A J_\nu(q_1 r) e^{j\nu\phi} e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (2.63)$$

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS
2.5. MODOS ÓPTICOS EN UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR

$$E_z(r, \phi, z, t) = r > a \rightarrow CK_\nu(q_1 r) e^{j\nu\phi} e^{j(\varpi t - \beta z)}, \quad (2.64)$$

$$H_z(r, \phi, z, t) = r \leq a \rightarrow BJ_\nu(q_1 r) e^{j\nu\phi} e^{j(\varpi t - \beta z)}, \quad (2.65)$$

$$H_z(r, \phi, z, t) = r > a \rightarrow DK_\nu(q_1 r) e^{j\nu\phi} e^{j(\varpi t - \beta z)}. \quad (2.66)$$

Cabe mencionar que representa una solución oscilatoria en el núcleo y evanescente en el revestimiento, cuando se cumple la condición de modos guiados:

$$n_2 k \leq \beta \leq n_1 k. \quad (2.67)$$

Como se menciono anteriormente, el resto de las componentes del campo electromagnético se obtiene a partir de E_z y H_z empleando las ecuaciones de Maxwell:

$$E_r = -\frac{j}{q^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\varpi \mu}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right), \quad (2.68)$$

$$E_\phi = -\frac{j}{q^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \varpi \mu \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right), \quad (2.69)$$

$$H_r = -\frac{j}{q^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\varpi \varepsilon}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right), \quad (2.70)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{q^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \varpi \varepsilon \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right). \quad (2.71)$$

2.5.6. La ecuación de dispersión

Las constantes A , B , C y D , necesarias para los campos tangenciales (E_z, E_ϕ, H_z, H_ϕ) y continuas en $r = a$. Se obtiene un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas A , B , C y D cuya solución se encuentra al anularse el determinante siguiente:

$$\begin{vmatrix} J_\nu(q_1 a) & 0 & -K_\nu(q_2 a) & 0 \\ \frac{\beta \nu}{q_1^2} J_\nu(q_1 a) & \frac{j \varpi \mu}{q_1} J'_\nu(q_1 a) & \frac{\beta \nu}{q_2^2} K_\nu(q_2 a) & \frac{j \varpi \mu}{q_2} K'_\nu(q_2 a) \\ 0 & J_\nu(q_1 a) & 0 & -K_\nu(q_2 a) \\ \frac{j \varpi \varepsilon_1}{q_1} J'_\nu(q_1 a) & \frac{\beta \nu}{q_1^2} J_\nu(q_1 a) & \frac{j \varpi \varepsilon_2}{q_2} K'_\nu(q_2 a) & \frac{\beta \nu}{q_2^2} K_\nu(q_2 a) \end{vmatrix} = 0. \quad (2.72)$$

Resolviendo el determinante obtenemos la siguiente ecuación de dispersión:

$$(J_\nu + K_\nu) \left(k_1^2 J_\nu + k_2^2 K_\nu \right) = \left(\frac{\beta \nu}{a} \right)^2 \left(\frac{1}{q_1^2} + \frac{1}{q_2^2} \right), \quad (2.73)$$

Donde:

$$J_\nu = \frac{1}{q_1} \frac{J'_\nu(q_1 a)}{J_\nu(q_1 a)}, \quad K_\nu = \frac{1}{q_2} \frac{K'_\nu(q_2 a)}{K_\nu(q_2 a)}. \quad (2.74)$$

Todas las ecuaciones de Maxwell cumplen la ecuación 2.73. Además se debe cumplir cuando cualquier modo se propague a través de la fibra. Un modo se propaga justo cuando $b=0$. En este caso, y según la ecuación:

$$b = \frac{a^2 q_2^2}{V^2}. \quad (2.75)$$

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS
2.5. MODOS ÓPTICOS EN UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR

$q_2 = 0$ por lo que la ecuación:

$$(q_1 a)^2 + (q_2 a)^2 = V^2, \quad (2.76)$$

$$V|_c = q_1 a. \quad (2.77)$$

Las frecuencias de corte de los modos son los ceros de la función, por lo que:

$$J_\nu(V|_c) = 0, \quad (2.78)$$

2.5.7. Solución de la ecuación de dispersión

Para resolver la ecuación de dispersión se utilizarán las siguientes relaciones:

$$\frac{dJ_n(x)}{dx} = \frac{1}{2} (J_{n-1}(x) - J_{n+1}(x)), \quad (2.79)$$

$$\frac{dJ_0(x)}{dx} = -J_1(x), \quad (2.80)$$

$$\frac{dK_n(x)}{dx} = \frac{1}{2} (K_{n-1}(x) - K_{n+1}(x)), \quad (2.81)$$

$$\frac{dK_0(x)}{dx} = -K_1(x). \quad (2.82)$$

$\nu = 0$ no existe variación de las componentes del campo con ϕ .

$$(J_\nu + K_\nu) (k_1^2 J_\nu + k_2^2 K_\nu) = 0. \quad (2.83)$$

Esta ecuación tiene dos soluciones:

Primera solución:

$(J_0 + K_0 = 0)$ o lo que es lo mismo:

$$\frac{J_1(q_1 a)}{q_1 J_0(q_1 a)} + \frac{K_1(q_2 a)}{q_2 K_0(q_2 a)} = 0. \quad (2.84)$$

Se puede comprobar que esta solución corresponde a una situación en la que $E_z = 0$ (modos TE). Las m soluciones de esta ecuación que cumplan la condición de modo guiado se denominarán TE_{0m} .

Segunda solución:

$(k_1^2 J_0 + k_2^2 K_0 = 0)$ o lo que es lo mismo:

$$n_1^2 \frac{J_1(q_1 a)}{q_1 J_0(q_1 a)} + n_2^2 \frac{K_1(q_2 a)}{q_2 K_0(q_2 a)} = 0. \quad (2.85)$$

Esta solución corresponde a una situación en la cual $H_z = 0$. Son los modos TM_{0m} . En estos casos, la componente del campo E_z y H_z pueden ser diferentes de cero a la vez, por lo que a los modos solución de esta ecuación se les denomina modos híbridos, y se les designa por HE o EH dependiendo de cuales son las componentes que dominan. En los modos EH dominarán las componentes del campo eléctrico y en los modos HE dominarán las componentes del campo magnético [39].

2.6. Micro-nano fibras ópticas

A las fibras ópticas que tienen un diámetro menor que la longitud de onda de la luz guiada también se les conoce como micro-nano fibras ópticas [5].

2.6.1. Modelo matemático

Una micro-nano fibra óptica con perfil de índice escalonado, como el modelo matemático representado por la figura 2.17, donde el índice de refracción del núcleo la FNM y el material del revestimiento son respectivamente n_1 y n_2 , y a es el radio de la fibra. Se define el perfil de índice de la guía de onda, como:

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & 0 < r < a \\ n_2, & a \leq r < \infty. \end{cases} \quad (2.86)$$

Ahora no desarrollaremos los modos electromagnéticos para la micro-nano fibra, puesto que

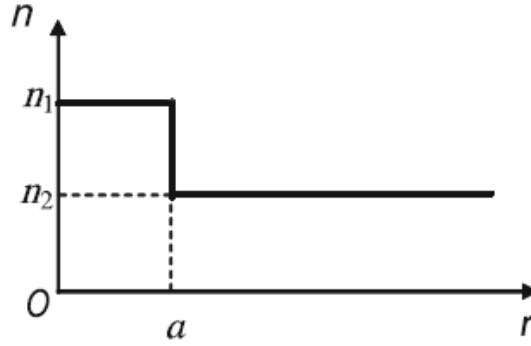


Figura 2.17: Perfil de índice de una micro-nano fibra que posee de recubrimiento el aire [1].

en la sección 2.5 se presenta a detalle el modelo matemático y la solución analítica de los modos de propagación en una fibra óptica. Refiriéndonos a la ecuación: $(J_\nu + K_\nu)(k_1^2 J_\nu + k_2^2 K_\nu) = 0$, obtenida en la sección 2.5, las dos soluciones para los modos guiados en una micro-nano fibra, son: Modos TE_{0m}

$$\frac{J_1(q_1 a)}{q_1 J_0(q_1 a)} + \frac{K_1(q_2 a)}{q_2 K_0(q_2 a)} = 0, \quad (2.87)$$

Modos TM_{0m}

$$n_1^2 \frac{J_1(q_1 a)}{q_1 J_0(q_1 a)} + n_2^2 \frac{K_1(q_2 a)}{q_2 K_0(q_2 a)} = 0. \quad (2.88)$$

Las soluciones numéricas de las ecuaciones 2.87 y 2.88, resultan en los modos guiados de una micro-nano fibra óptica. En general, cuando el diámetro de la fibra es menor que la longitud de onda de la luz que se propaga en la fibra, y tiene un bajo índice de refracción en el revestimiento (por ejemplo, el vacío o el aire) presenta propiedades muy particulares, campos evanescentes intensos, confinamiento óptico restringido y excelente tolerancia a la dispersión, lo que abre paso a nuevas formas de manipulación de la luz a micro-nanoescala.

2.6.2. Propiedades ópticas

Podemos describir las propiedades y características de las micro-nano fibras ópticas como:

- **El confinamiento óptico hermético;** permite que las guías de onda ópticas con radio de curvatura y área modal pequeña, presenten ventajas en el desarrollo de dispositivos o circuitos ópticos con trayectorias ópticas cortas, pequeña dimensión y/o bajo consumo de potencia.
- **Los campos evanescentes intensos;** se presentan con mayor intensidad y mayor rapidez en la interfaz núcleo-revestimiento, cuando la luz con una longitud de onda mayor que el núcleo de la fibra interacciona con el revestimiento, lo que implica una alta sensibilidad y/o respuesta rápida, además, el acoplamiento entre una micro-nano fibra con otra guía de onda permite fácilmente la creación de campos evanescentes.
- **Peso liviano;** ya que su masa es pequeña. Una micro-nano fibra puede presenciar y responder al cambio del momento de los fotones guiados a través de vibraciones mecánicas o de desplazamiento, con esto podemos descubrir componentes o dispositivos optomecánicos usando fibras delgadas, como un evidente acoplamiento desencadenado fotón-fotón o la conversión en estas fibras delgadas.

2.7. Fibras cónicas

Una micro-nano fibra también es conocida como una fibra cónica (en inglés conocidas como fibras “tapers”). Recibe este nombre debido a la forma que presenta en la región reducida.

La propagación de la luz a lo largo de una fibra cónica se ha resuelto en base a técnicas de aproximación analíticas, sin embargo como analizaremos, dicha solución analítica, lo que hace valido el uso de técnicas numéricas integradas en softwares especializados que nos permitan encontrar la solución analítica de este tipo de guía de ondas.

2.7.1. Solución de la ecuación de onda

A continuación expresaremos la solución de la ecuación de onda en la vecindad de una micro-nano fibra óptica con parámetros variantes adiabáticos. La ecuación en este caso es de la forma:

$$U(\rho, z)_{r \ll \rho \lesssim |\gamma^0(z)|^{-1}} \approx \left(\frac{2}{\pi k}\right)^{\frac{1}{2}} \gamma^0(z) K_0[\gamma^0(z)\rho] \exp\left[i \int^Z \left(k - \frac{\gamma^0(z)^2}{2k}\right) dz\right]. \quad (2.89)$$

Donde la función $\gamma^0(z)$ es la constante transversal de propagación con el índice ⁽⁰⁾ que es agregado por conveniencia. La ecuación 2.89 es valida en una vecindad cerrada de una nano-fibra.

La solución fuera de la fibra cónica, se describe de la siguiente forma:

$$U_j(\rho, z)_{|\gamma_j^0(z)|\rho \gg 1} \approx A_j(\rho, z) e^{iS_j(\rho, z)}, \quad (2.90)$$

Donde la amplitud $A_j(\rho, z)$ y $S_j(\rho, z)$ depende de la función $\gamma_j(\rho, z)$:

$$A_j(\rho, z) = \left(\frac{i\gamma}{2k\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{z - z_j^0(\gamma)}{\gamma \left[dz_j^0(\gamma/d\gamma) \right]} - 1 \right\}^{-\frac{1}{2}} \Bigg|_{\gamma=\gamma_j(\rho, z)}, \quad (2.91)$$

$$S_j(\rho, z) = kz - \frac{\gamma^2}{2k}z + \gamma\rho + \frac{1}{k} \int^{\gamma} \gamma z_j^0(\gamma) d\gamma \Bigg|_{\gamma=\gamma_j(\rho, z)}. \quad (2.92)$$

2.7.2. Propagación de la luz a través de la fibra cónica

Es importante discutir como se propaga la luz en una fibra cónica y cuál es el fenómeno que se presenta entre el núcleo y el revestimiento. Por esto se analizará de manera breve el comportamiento del campo evanescente en una fibra cónica, lo cuál es determinado por la función multi-valuada $\gamma(\rho, z)$.

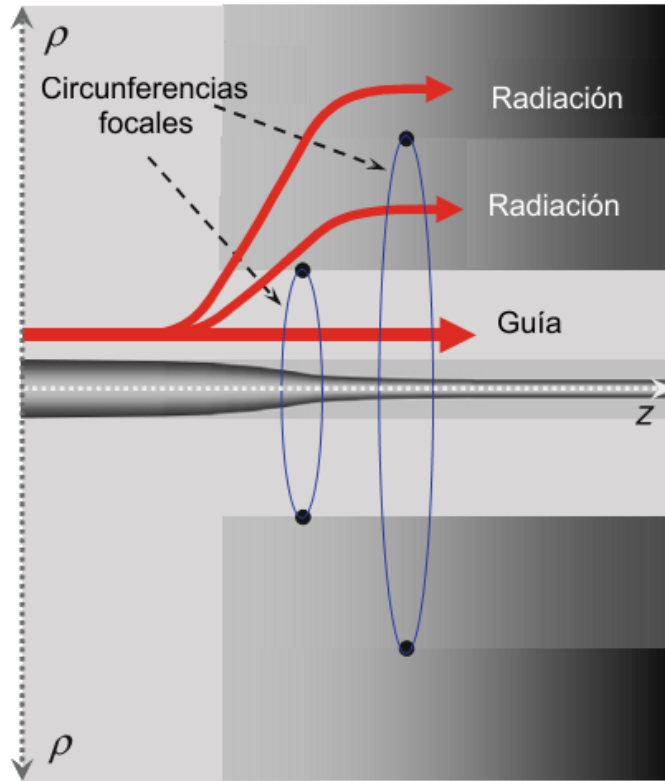


Figura 2.18: Comportamiento característico de la propagación de la radiación en una fibra cónica [1].

La figura 2.18 muestra esquemáticamente una superficie gráfica del valor $Re[\gamma(\rho, z)]$, el cuál contiene niveles de ramificación representados por los puntos negros. Los niveles ramificados pertenecen a un complejo caustico de un sistema de rayos (por ejemplo la curvatura

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS

2.7. FIBRAS CÓNICAS

focal en donde la amplitud $A_j(\gamma, z)$ en la ecuación se vuelve infinito). Los puntos focales son las proyecciones de las circunferencias focales en el espacio real en tres dimensiones (3D), como se muestra en la figura 2.18.

La propagación de la luz a lo largo de la fibra cónica se visualiza en la figura 2.18. El modo de propagación está dirigido desde el lado izquierdo de la fibra. En la vecindad de cada punto focal, el modo se encuentra dividido en dos componentes. Por ejemplo, después de pasar el punto de ramificación más bajo, el campo se divide en dos componentes, los cuales son guiados por la fibra nanométrica, y la componente superior, es la componente de radiación que contribuye a la pérdida de radiación que es exponencialmente pequeña. De igual forma, las componentes inferior y superior del campo cercano del punto focal superior están radiando y por lo tanto contribuyen a la pérdida por radiación.

En general, en las fibras cónicas, las circunferencias focales se encargan de la división de los componentes de radiación, de manera que el modo guiado y las componentes de radiación interfieren entre sí dando lugar a un comportamiento complejo de campo evanescente [1].

Capítulo 3

Guías de onda sublongitud de onda: Análisis y diseño

El desarrollo actual de la fotónica y de la nanotecnología ha permitido apreciar el mundo a escalas tan pequeñas como unas decenas de átomos, lo que ha revolucionado la forma de comunicación, los medios computacionales, la medicina, y en general diversas áreas. Para tal desarrollo, ha sido crucial comprender y proponer adecuadamente modelos acerca del comportamiento de la interacción de la luz con estructuras a escala nanométrica.

Paralelamente, el gran avance computacional así como el desarrollo de nuevas herramientas numéricas empleadas como técnicas de diseño, han convertido a la simulación por computadora en un elemento esencial para el desarrollo de dispositivos fotónicos. Consecuentemente se ha reconocido que el modelado computacional para la interacción óptica con estructuras a nanoescala se basa en la solución numérica de las ecuaciones de Maxwell, debido a que el estudio de estructuras con dimensiones menores que la longitud de onda de la luz que se propaga, impone restricciones muy específicas en base a la forma de como se realizan los cálculos. En principio, no es viable realizar aproximaciones del campo electromagnético, por lo que deben integrarse las ecuaciones de Maxwell directamente, por ejemplo a través el dominio temporal, espectral, empleando el elemento finito o diferencias finitas, lo que involucra resolver un sistema de seis ecuaciones diferenciales parciales acopladas simultáneamente, adicionalmente hay que tomar en consideración las condiciones de frontera y la relaciones de la interacción radiación-materia. Además, el mallado de la región es otro aspecto fundamentalmente importante, pues es la condición básica para garantizar la estabilidad de los métodos numéricos. El mallado puede llegar a ser un incremento temporal de centésimas de femtosegundos, lo que indica que la cantidad de iteraciones a realizar es enorme, de ahí la necesidad de emplear computadoras robustas [40].

Hoy en día es imprescindible el empleo de herramientas numéricas de simulación para encontrar la solución numérica en guías de onda a escalas nanométricas o geometría compleja, pues como se mencionó, en la mayoría de los casos resulta complejo modelar el sistema y hallar la solución analítica.

Lumerical es un software especializado en fotónica. Es una poderosa herramienta capaz de analizar estructuras con dimensiones nanométricas y geometría arbitraria. Lumerical cuenta con dos herramientas de análisis que son empleadas en esta tesis: FDTD y MODE Solutions,

éste último de ahora en adelante referiremos como Analizador de Modos. Éstos métodos numéricos son empleados para resolver las ecuaciones de Maxwell aplicadas a diversos problemas electrodinámicos. A continuación se definen los métodos empleados para el análisis de guías sublongitud de onda, para introducir el método numérico computacional FDTD, después se describen las guías de onda que fueron diseñadas y posteriormente simuladas en FDTD y el Analizador de Modos para analizar la propagación de la luz en dichas guías de onda.

3.1. Análisis en guías de onda ópticas

Las guías de onda ópticas pueden guiar o conducir la luz a través de una dirección específica, y según sus características se emplean en distintas áreas, como: en circuitos ópticos integrados o en la tecnología de fibra óptica; debido a la propiedad que tienen de conducir la luz, es común que se fabriquen con materiales dieléctricos.

Las características de propagación en guías de onda ópticas pueden ser calculadas mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell, aunque esto no es una tarea nada sencilla. Hay diversas razones por las cuales el análisis en guías de onda ópticas resulta tan complicado, a continuación mencionamos algunas de estas:

- Las guías de onda ópticas tienen geometría compleja, por ejemplo, las guías de onda circulares.
- Algunas guías de onda tienen una distribución de índice de refracción gradual, por ejemplo, las guías ópticas que han sido dopadas o las fibras ópticas en las que su núcleo no es uniforme.
- El rango de distribución del campo electromagnético es muy grande, incluso puede ser infinito.
- Hay diversos materiales que tienen un índice de refracción complejo, como los metales, o materiales anisotrópicos y materiales ópticos no lineales.

Debido a las dificultades anteriormente descritas se han desarrollado varios métodos para el análisis de guías de onda ópticas. Estos métodos se clasifican en: soluciones de aproximación analítica y soluciones numéricas utilizando herramientas computacionales.

Las soluciones de aproximación analítica para guías de onda ópticas son una solución analítica exacta que puede ser obtenida para guías de onda ópticas de índice escalonado en dos dimensiones (2D). Pero si la guía de onda presenta una distribución de índice de refracción gradual, entonces el análisis ya no es posible. Por ello, los métodos como el método de aproximación por rayos y el método WKB (conocido así por las iniciales Wentzel-Kramers-Brillouin, un método de aproximación para la solución de ecuaciones diferenciales) son empleados para encontrar las soluciones analíticas de las guías de onda de índice gradual. Para guías de onda ópticas de tres dimensiones (3D), como fibras ópticas no simétricas se emplea el análisis del modo-híbrido que requiere satisfacer las debidas condiciones de contorno.

Por otro lado, las soluciones numéricas mediante herramientas computacionales constituyen actualmente un medio para encontrar la solución numérica a través del establecimiento de las condiciones de contorno, pues como se mencionó antes, la solución de las condiciones

CAPÍTULO 3. GUÍAS DE ONDA SUBLONGITUD DE ONDA: ANÁLISIS Y DISEÑO

3.2. ANALIZADOR DE MODOS

de contorno para guías de onda de índice gradual resulta complicado. El dominio de las soluciones numéricas incluye, el método de aproximación multicapa (MAM, por sus siglas en inglés), el método variacional (VM, por sus siglas en inglés), el método del elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés), y el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD, por sus siglas en inglés) [32].

El método de diferencias finitas en el dominio del tiempo se ha convertido en una herramienta poderosa para la solución de problemas en un gran número de áreas para distintas aplicaciones, como lo es: la industria automotriz, la aeronáutica, la construcción, y en especial, a adquirido un fuerte desarrollo en aplicaciones para problemas de electromagnetismo. Con el avance actual de las tecnologías de la computación y herramientas de diseño asistido por computadora los problemas que resultaban bastante complejos ahora se modelan con relativa facilidad. Tal es el impacto de las herramientas numéricas en la solución de diversos problemas, que aún cuando la solución analítica (de forma cerrada) puede resolverse y resulta exacta, se hace uso de una computadora para trasladar la solución analítica a valores numéricos mediante un serie de parámetros dados. Lo que hace posible reproducir y probar una serie de configuraciones en la computadora antes de que un primer prototipo experimental sea construido [12, 17].

Lumerical es un software de simulación especializado en resolución de problemas electromagnéticos, combina el diseño y análisis asistido por computadora, proporcionando una plataforma poderosa para la investigación en áreas como óptica, electromagnetismo, fotónica, plasmónica, entre otras. Su nombre se deriva de las palabras luminoso y numérico (en inglés “*Luminous*” y “*Numerical*”), haciendo referencia al concepto de luz, y al hecho de que se trata de un método numérico, respectivamente. Lumerical cuenta con dos herramientas que serán empleadas en esta tesis para analizar la propagación de la luz (frecuencias del rango visible hasta cerca del infrarrojo) en guías de onda sublongitud de onda [14].

La nanofotónica es un área que estudia como la luz interacciona con estructuras a escala sublongitud de onda, con tal interacción, los fotones se confinan en estructuras a nanon escala, y el resultado del campo electromagnético guiado dentro de la estructura puede definirse resolviendo las condiciones de contorno de las ecuaciones de Maxwell. Innovar estructuras capaces de guiar y confinar la luz a esa escala, genera un amplio campo de investigación y diseño. A continuación se presenta el diseño de guías de onda ópticas circulares y cónicas.

3.2. Analizador de Modos

El Analizador de Modos al igual que FDTD emplean el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo para simular la propagación guiada de los campos (en el apéndice A se define con detalle el método FDTD).

3.2.1. Descripción y diseño de una fibra óptica micro-nanométrica

En la imagen de la Figura 3.1 se muestra una fibra óptica nanométrica vista desde una perspectiva tridimensional. La fibra micro-nanométrica es el tubo plateado centrado en la región de simulación delimitada como el contorno cuadrangular naranja, el cual es transversal a la fibra, la caja rectangular naranja representa la región de mallado.

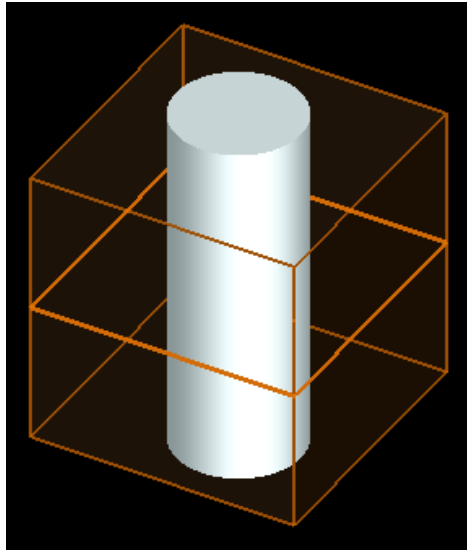


Figura 3.1: Fibra nanométrica definida en el Analizador de Modos.

FDTD utiliza por defecto una región de mallado rectangular como se observa en la Figura 3.2, mediante el mallado se calculan las propiedades físicas, geométricas y parámetros como el campo eléctrico y magnético en cada punto de la malla; si el mallado es muy fino, se produce una mejor aproximación debido a que se toman en consideración más puntos que delimitan la estructura, por otro lado hay que tomar en cuenta que esto requiere mayores tiempos de simulación consumiendo más recursos. A veces conviene agregar una malla adicional que nos permita tener una mayor precisión [14].

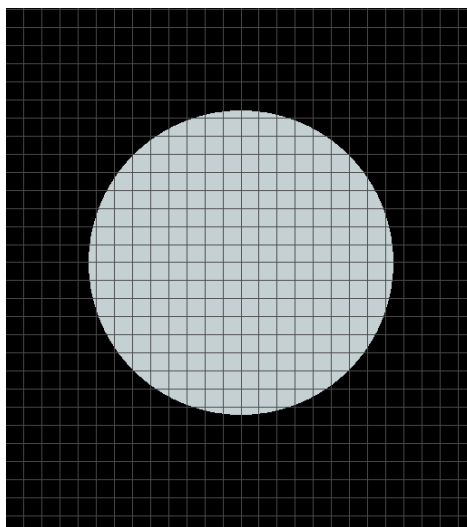


Figura 3.2: Mallado definido en el Analizador de Modos.

Cada elemento que forma parte del entorno de simulación se muestra en la Figura 3.1, a

continuación se describen las propiedades geométricas y físicas de la estructura.

3.2.1.1. Propiedades del material

En la tabla 3.1 se observan los parámetros que se establecieron para definir las propiedades del material.

Propiedad	Valor
Material	Dióxido de Silicio Si_2
Índice de refracción	1.45

Tabla 3.1: Propiedades del material de la fibra micro-nanométrica.

3.2.1.2. Dimensiones de la estructura

En la tabla 3.2 se definen las dimensiones de la fibra nanométrica en el área de simulación.

Propiedad	Parámetro	Valor
Geometría	x(nm)	0
	x(nm)	0
	y(nm)	0
	z(nm)	0
	z span(nm)	1000
	radio(nm)	225

Tabla 3.2: Geometría de la guía de onda.

3.2.1.3. Región de simulación

La región de simulación es el entorno que delimita el espacio computacional, estableciendo un área con dimensiones finitas. Establecer dicha región computacional involucra establecer condiciones de frontera adecuadas según la estructura que se pretenda analizar.

3.3. FDTD

La otra herramienta numérica disponible en el paquete de Lumerical, es el método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD, por sus siglas en ingles), este método se ha vuelto muy popular ya que constituye una poderosa teoría de simulación para la resolución de problemas electromagnéticos descritos por las ecuaciones de Maxwell. Para resolver las ecuaciones que describen el sistema, las ecuaciones se reemplazan por un sistema de ecuaciones en diferencias finitas donde es preciso elegir las componentes a evaluar de manera conveniente. Cuando se soluciona este tipo de sistema la solución satisface las condiciones de frontera, las cuales involucran capas de acoplamiento perfecto (PML por sus siglas en inglés).

Región de simulación	Parámetro	Valor
Especificaciones generales	algorithm	Finite Difference
	solvertype	2D-Z normal
Geometría	x(nm)	0
	x span(nm)	700
	y(nm)	0
	y span(nm)	700
	z(nm)	0
Condiciones de contorno	xmin bc	metal
	xmax bc	metal
	ymin bc	metal
	xmax bc	metal

Tabla 3.3: Definición de las propiedades de la región de simulación.

La herramienta numérica de simulación FDTD define 4 tipos de condiciones de contorno: Capa de acoplamiento perfecto (en inglés PML), metal, periódica, simétrica, anti-simétrica y bloch, en el apéndice se explican a detalle las condiciones de contorno PML.

3.3.1. Descripción y diseño de una fibra cónica

La imagen de la figura 3.3 muestra una fibra taper diseñada en FDTD vista desde una perspectiva tridimensional. A continuación se presentan los parámetros físicos y geométricos de la estructura.

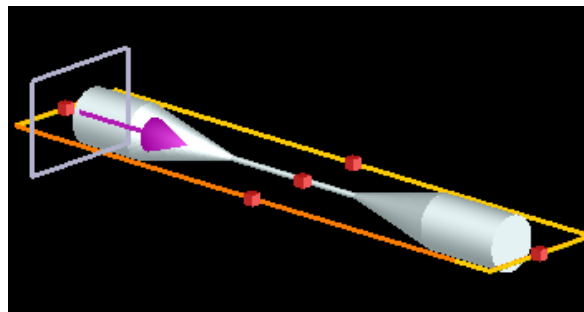


Figura 3.3: Fibra taper.

FDTD cuenta con estructuras preestablecidas que podemos utilizar para diseñar el objeto o sistema deseado. En particular la fibra cónica fue construida a partir del ensamble de estructuras circulares y de estructuras *custom*, como se muestra en la Figura 3.4. Las estructuras circulares fueron descritas anteriormente ya que se emplearon para crear las fibras nanométricas en el Analizador de Modos. Por otro lado, la estructura *custom* tiene características muy interesantes que permiten modelar objetos con geometrías particulares, enseguida se hará una descripción de este tipo de estructuras.

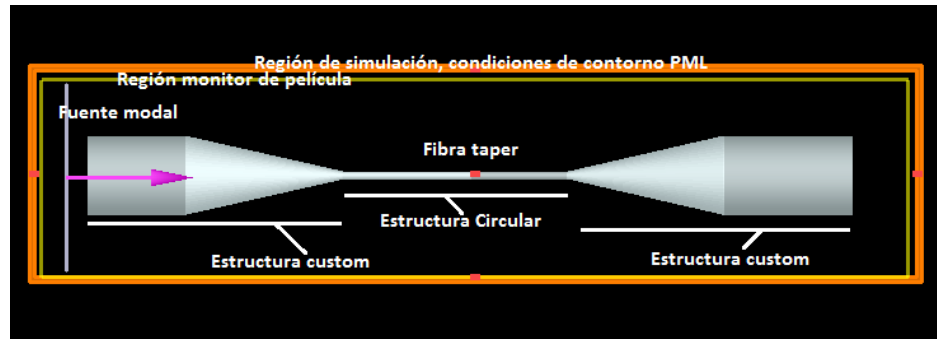


Figura 3.4: Vista x, y de la fibra cónica: tipo de estructuras empleadas y descripción de los elementos de simulación.

3.3.1.1. Estructura *custom*

La estructura *custom* esta disponible en el área de trabajo de FDTD, figura 3.5 (a), su característica principal es que se puede parametrizar la estructura mediante la descripción de una ecuación que delimite el contorno de la figura [14].

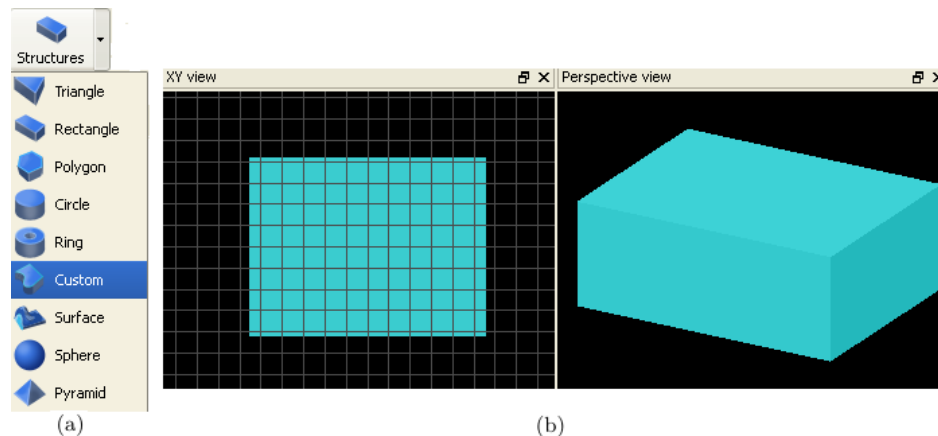


Figura 3.5: (a) Estructura *custom*.(b) Forma predeterminada de la estructura *custom*.

Como se menciono antes, la forma de la estructura “*custom*” esta definida mediante ecuaciones que delimitan el contorno físico del objeto. Específicamente las ecuaciones que se definan estarán en función de x , generando la posición en y , es decir, estableciendo una función analítica $y = f(x)$ como se muestra en la Figura 3.6 (a).

Pueden establecerse dos ecuaciones; la ecuación 1 y la ecuación 2, respectivamente, crean la forma superior e inferior del objeto, como se observa en la Figura 3.6 (b).

Para crear un objeto en 3D, la posición en z se obtiene a partir de “*extruir*” o “*revolucionar*” el contorno físico establecido en y .

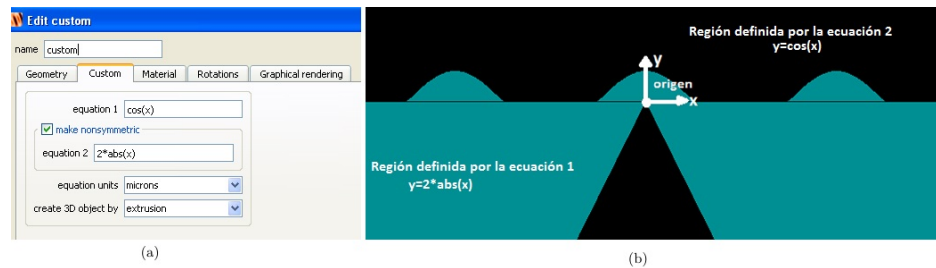


Figura 3.6: (a)Parámetros de la ecuación custom. (b)Estructura custom construida a partir de las ecuaciones 1 y 2.

3.3.1.2. Empleo de estructuras *custom*

Cuando se emplea una estructura *custom*, el objeto agregado al área de trabajo tiene por defecto una forma rectangular (3.5 (b)). La fibra cónica se caracteriza por el adelgazamiento que sufre la fibra al estirarse, para crear tal adelgazamiento en la parte central de un tubo de fibra, se modela la estructura rectangular mediante una ecuación que nos describa el comportamiento cónico de la fibra, en la tabla 3.4 se muestra la ecuación empleada [14] para crear la conicidad en un extremo de la fibra.

Posición en x	Posición en y donde $y = 5 - \frac{x+10}{(20) \cdot (4.5)}$
-10 μm	5 μm
-9 μm	4.77 μm
-8 μm	4.55 μm
-7 μm	4.32 μm
-6 μm	4.10 μm
-5 μm	3.87 μm
-4 μm	3.65 μm
-3 μm	3.42 μm
-2 μm	3.20 μm
-1 μm	2.97 μm
0 μm	2.75 μm
1 μm	2.52 μm
2 μm	2.30 μm
3 μm	2.07 μm
4 μm	1.85 μm
5 μm	1.62 μm
6 μm	1.40 μm
7 μm	1.17 μm
8 μm	0.95 μm
9 μm	0.72 μm
10 μm	0.05 μm

Tabla 3.4: Valores en x,y ; variación de la posición en el eje y con respecto al eje x .

En la tabla 3.4 se observa como varía paulatinamente la posición en y respecto de x , nos interesa manipular las dimensiones de la fibra, con la ecuación definida en la tabla 3.4, el eje y varía de $5 \mu\text{m}$ a $0.5 \mu\text{m}$.

3.3.1.3. Estructuras empleadas para formar la fibra cónica

Para crear la fibra taper se emplean tres estructuras circulares y dos estructuras *custom*. Como se observa en la figura 3.7, las estructuras circulares 1 y 5 tienen las mismas dimensiones, poseen un radio de $5 \mu\text{m}$. El radio de la estructura circular 3 es de $0.5 \mu\text{m}$ (solo como un ejemplo, puesto que se hacen pruebas cambiando este parámetro).

Un cambio en la geometría de cualquier estructura implica cambiar las medidas de las estructuras adyacentes a esta, si variamos el radio de la estructura 3, tienen que cambiar las dimensiones de las estructuras *custom* 4 y 5, puesto que estas se modelaron respecto a la ecuación definida en la tabla 3.4, se debe notar que en la ecuación al variar el valor de la constante definida como 4.5, cambiará la longitud del extremo de la estructura *custom* que es adyacente a la estructura 3.

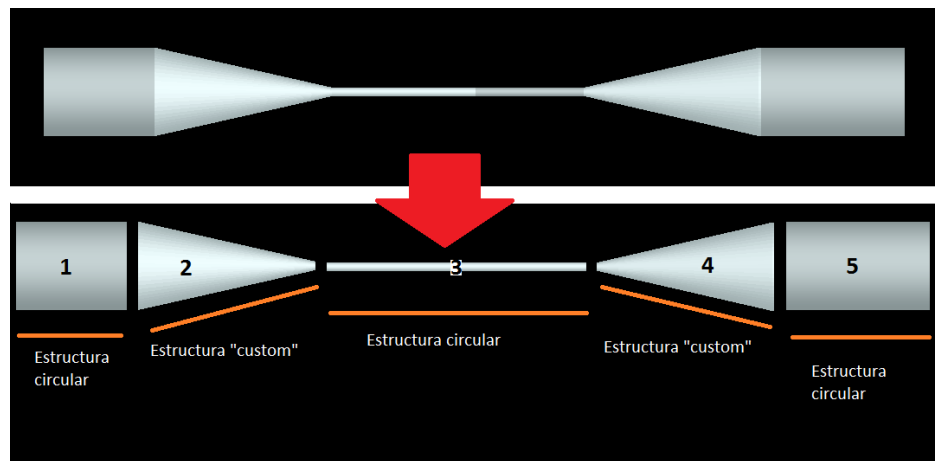


Figura 3.7: Definición de estructuras usadas para crear la fibra taper, vista x, y .

En resumen la tabla define los parámetros que se establecieron para el diseño de la fibra cónica.

3.3.1.4. Tipo de fuente

En FDTD y el Analizador de Modos cuentan con distintos tipos de fuentes de luz. Se empleó una fuente gaussiana, la cuál es un haz de radiación electromagnética propagándose en una dirección específica con una amplitud definida, en este caso establecida en la región de simulación. Por *default*, este tipo de fuente incidirá una aproximación de haz escalar para el campo eléctrico, y es válido cuando las dimensiones del haz son mucho mayores que el límite de difracción, aunque se puede establecer en la pestaña *Beam Option*, las propiedades del haz propagado.

Es posible definir la **longitud de onda** al momento de editar las propiedades de la fuente de incidencia. En la tabla 3.6 se describen las propiedades definidas para la fuente de incidencia.

Propiedad	Región de simulación	
	Parámetro	Valor
Especificaciones generales	algorithm	FDTD
	dimension	2D
	time simulation $f(s)$	1000
Geometría	$x(\mu\text{m})$	33.53
	x span(μm)	110
	$y(\mu\text{m})$	-0.4
	y span(μm)	25
	$z(\mu\text{m})$	0
Condiciones de contorno	xmin bc	PML
	xmax bc	PML
	ymin bc	PML
	xmax bc	PML

Tabla 3.5: Definición de las propiedades de la región de simulación.

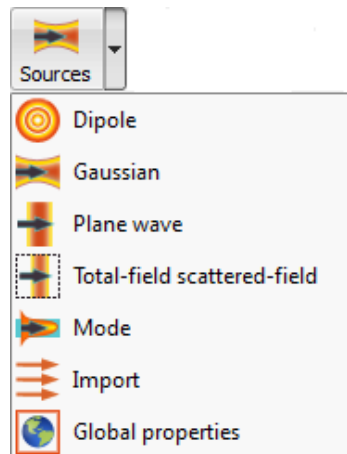


Figura 3.8: Fuentes disponibles en FDTD.

3.3.1.5. Monitor de película

Para el análisis de la propagación de la luz en guías de onda, el software FDTD provee de varios elementos que nos permiten almacenar parámetros como potencia, campo eléctrico, campo magnético, entre otros. En este caso, se empleó un **monitor de película**, este tipo de monitores pueden almacenar en un archivo .mpg el campo \mathbf{E} o \mathbf{B} en función del tiempo, de esta manera podemos visualizar la progresión de la luz en la guía de onda a través del tiempo, en la tabla 3.7 se muestran las propiedades que fueron establecidas para el monitor de película.

	Fuente Modal	
Propiedad	Parámetro	Valor
Especificaciones generales	Injection axis	x
	Direction	Foward
	Amplitude	3
Geometría	$x(\mu\text{m})$	-18.2
	$x \text{ span}(\mu\text{m})$	0
	$y(\mu\text{m})$	-0.3
	$y \text{ span}(\mu\text{m})$	23.8
	$z(\mu\text{m})$	0
	$z \text{ span}(\mu\text{m})$	17
Longitud de onda	Wavelength start(nm)	551
	Wavelength stop(nm)	693

Tabla 3.6: Definición de las propiedades de la fuente de incidencia.

	Monitor de película	
Propiedad	Parámetro	Valor
Especificaciones generales	Simulation type	2D-Z normal
Geometría	$x (\mu\text{m})$	33.7
	$x \text{ span} (\mu\text{m})$	110
	$y (\mu\text{m})$	-0.4
	$y \text{ span} (\mu\text{m})$	25
	$z (\mu\text{m})$	0

Tabla 3.7: Definición de las propiedades del monitor de película.

3.3.2. Diseño de una fibra cónica empleando estructura de grupo y parámetros de barrido

El proceso de automatización para la generación de los parámetros de dispersión y modos electromagnéticos en una fibra nanométrica, implicó el uso de parámetros de barrido. Como se observa en la figura 3.7, la fibra cónica se forma a partir de estructuras primitivas, es decir, a partir de estructuras circulares y estructuras *custom*, debido a que la fibra cónica se diseño a base de dichas estructuras, para el uso de barridos de parámetros se creo una estructura de grupo. Las estructuras de grupo facilitaron en gran medida la obtención de los parámetros de barrido deseados.

3.3.2.1. Construyendo una estructura de grupo

Las estructuras de grupo están disponibles en el Analizador de Modos y FDTD, este tipo de estructuras tienen dos características principales:

- Un grupo de estructuras primitivas.
- Un archivo para editar el grupo de estructuras primitivas.

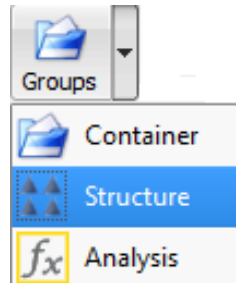


Figura 3.9: Estructura de grupo.

Para el diseño de la fibra cónica se agregó al espacio de trabajo de FDTD una estructura de grupo. Las propiedades de cada una de las estructuras primitivas se describen en la tabla 3.8. En la ventana de comandos de la estructura de grupo se emplearon todas las propiedades de las estructuras primitivas definidas en la tabla 3.8, de manera que se describió, mediante un conjunto de comandos el tipo de estructuras que deberían insertarse al espacio de trabajo, la disposición espacial (las coordenadas) de cada estructura, las dimensiones de la estructura y el tipo de material, en otras palabras, se describieron todas las propiedades físicas y geométricas de cada una de las estructuras. El diseñar la fibra cónica como una estructura de grupo nos facilitó en gran medida la manipulación de los parámetros de barrido.

Como se muestra en la figura 3.10, la estructura de grupo se conformo por 3 estructuras circulares y 2 estructuras “custom”, las cuáles, para su mejor manipulación fueron renombradas según su posición en la figura 3.7:

- La estructura circular situada a la izquierda, fue nombrada como *circle in*.
- La estructura *custom* situada a la izquierda, fue nombrada *taper*.
- La estructura circular centrada entre las dos estructuras *custom*, fue nombrada como *circle middle*.
- La estructura *custom* que se encuentra a la derecha, fue nombrada *taper2*.
- La estructura circular de la derecha, fue nombrada *circle out*.

3.3.2.2. Parámetros de barrido para la fibra cónica

El diseño automatizado de una fibra cónica se realizó a partir de los parámetros de barrido. Se editó un archivo (*script*) en el que se programó un único barrido que ejecutará las variaciones del radio de la fibra circular, y simultáneamente modificará la geometría de las estructuras *custom* (como se observa en la tabla 3.9). Para la estructura circular localizada entre las dos estructuras *custom* se hizo un barrido en el radio de la estructura, lo que representó el adelgazamiento de la fibra, se dispuso una variación proporcional de $0.25 \mu\text{m}$ en un rango de $0.5 \mu\text{m}$ hasta $2 \mu\text{m}$. Por otro lado para la geometría de las estructuras *custom*, el parámetro “n”, representa una constante en la ecuación $y = 5 - (x + 10)/((20)(4.5))$, dicha ecuación define la conicidad de la estructura *custom*. Puesto que las estructuras *custom*

Propiedad	Nombre	Tipo	Valor	Unidades
Radio	radius circle in	length	5	μm
Radio	radius circle middle	length	0.5	μm
Geometría	x circle in	length	9.26925	μm
Geometría	x circle middle	length	31.2	μm
Geometría	x circle out	length	73.5	μm
Geometría	x uno	length	7	μm
Geometría	x dos	length	55.4	μm
Geometría	x span	length	20	μm
Geometría	y span	length	10	μm
Geometría	z span	length	10	μm
Geometría	z span circle in	length	6.26925	μm
Geometría	z span circle middle	length	14.2537	μm
Geometría	z span circle out	length	8.1037	μm
Ejes	first axis2	text	z	—
Ejes	second axis2	text	y	—
Ejes	third axis2	text	x	—
Rotación	rotation	number	90	—
Rotación	rotation dos	number	45	—
Rotación	rotation taper	number	180	—
Parámetros de ecuación	equations units	text	microns	—
Parámetros de ecuación	n	number	4.5	—
Estructura taper	revolution	text	revolution	—

Tabla 3.8: Definición de las propiedades de las estructuras primitivas.

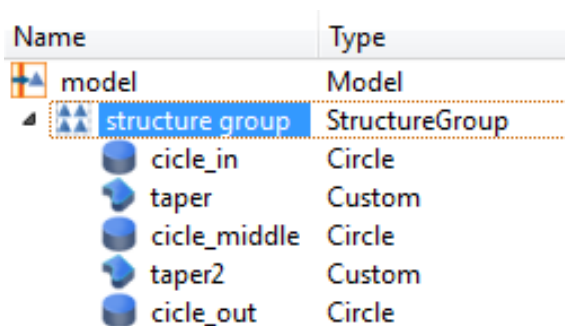


Figura 3.10: Estructura primitivas añadidas a la estructura de grupo.

se definen a través de ecuaciones, al cambiar el valor de la constante 4.5 en la ecuación, se cambió la conicidad de la estructura para cada valor propuesto, por ello fueron calculados los valores que cumplían que la conicidad adyacente a la estructura circular coincidiera con el radio de ésta estructura. En este caso los valores calculados para el parámetro de barrido “n”, estuvieron en el rango de $4.5 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$, en variaciones proporcionales de 0.25 nm.

En este capítulo se describió el proceso de diseño y simulación de las fibras micro-nano

Propiedad	Parámetro	Tipo	Unidades	Valores
Variación del radio	::model::structure group ::radius circle midle	length	μm	0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2
Variación del parámetro de la ecuación	::model::structure group::n	number	—	4.5 4.25 4 3.75 3.5 3.25 3

Tabla 3.9: Definición de las propiedades del parámetro de barrido.

métricas. Los resultados acerca de la modos de propagación en guías de onda sublongitud de onda y el comportamiento del campo evanescente en fibras cónicas será expuesto en el capítulo siguiente.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados de la propagación de la luz (con longitudes de onda del espectro visible al infrarrojo) en guías de onda nanométricas mediante las herramientas de simulación numéricas FDTD y Analizador de Modos.

4.1. Análisis modal en una micro-nano fibra óptica

Se presenta el análisis de la propagación de la radiación en una micro-nano fibra óptica. El análisis se basa en la variación de tres parámetros: la longitud de onda de operación λ , el índice de refracción n_{rev} (en donde el subíndice *rev* indica que es el revestimiento de la fibra) y el radio del núcleo de la fibra r ó d el diámetro de la fibra óptica.

Mediante el Analizador de Modos se presentan los resultados de los modos guiados en una micro-nano fibra óptica primero tomando como revestimiento el aire, y segundo tomando como revestimiento un índice de refracción distinto al del aire, por lo que se propone variar n_{rev} . Se presenta la intensidad del modo fundamental a partir de la variación de parámetros geométricos y físicos de la micro-nano fibra óptica, en este caso, primero se registran los resultados a partir de las variaciones del diámetro de la fibra y la longitud de onda guiada a través de ella. Posteriormente se analizan los resultados obtenidos de las variaciones en el índice de refracción del revestimiento de la fibra óptica.

Cabe mencionar, que para realizar las variaciones propuestas de los parámetros físicos y geométricos de la micro-nano fibra óptica, en un principio fueron creados aproximadamente 80 archivos (sin considerar pruebas iniciales), los cuáles se editaron uno a uno modificando las propiedades físicas y geométricas de la estructura, se hicieron variaciones en el radio de la fibra óptica y la longitud de onda de la luz propagada a través de ella, y se obtuvieron las simulaciones acerca de los modos de propagación de la micro-nano fibra óptica. Sin embargo, en el transcurso, la potencialidad de las herramientas numéricas salió a relucir para ayudar de manera significativa en el desarrollo y realización de las pruebas. Debido a que las pruebas implicaron un proceso repetitivo en el que se variaba un parámetro con respecto a otros que se mantenían fijos, fue utilizado un parámetro disponible en el Analizador de Modos (también en FDTD) que es capaz de generar un proceso automatizado que ejecute un gran número de simulaciones, lo que permite encontrar los valores de los parámetros deseados [14]. Dichos parámetros fueron empleados para ejecutar las simulaciones que fueron editadas en

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA

un principio de manera manual, por lo que se obtuvieron los mismos resultados creando un solo archivo, de tal forma que se ejecutarán de manera automatizada todas las simulaciones deseadas, logrando la obtención de resultados sin mayor esfuerzo que los recursos consumibles por la computadora.

En la figura 4.1 se describe el entorno bidimensional en el que el Analizador de Modos nos entrega los resultados del análisis modal en una micro-nano fibra óptica. En este caso, el mallado se realiza en una sección transversal de la fibra, presentándose una vista en dos dimensiones (2D), se observa también en la figura 4.1 que el núcleo de la fibra es el contorno circular negro, puesto que se considera que el revestimiento es el aire, el límite es el espacio delimitado por la región de simulación. Se observa un campo evanescente en la interfaz núcleo-revestimiento. La intensidad de radiación se representa gráficamente mediante una escala de colores (barra vertical situada a la derecha), el color azul asociado con el número 0 denota intensidades mínimas y el color carmín asociado con el número 1 representa la máxima intensidad.

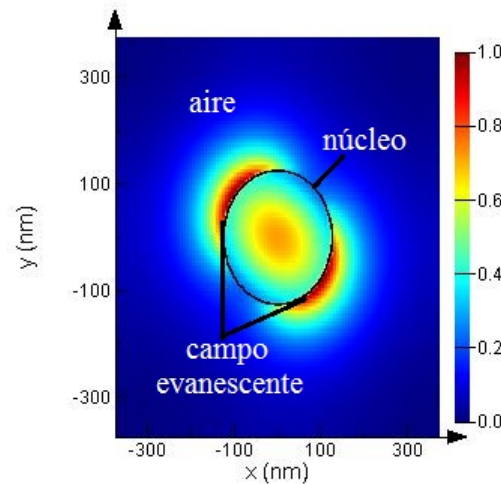


Figura 4.1: Cálculo del modo fundamental para una longitud de onda $\lambda=550$ nm y $d=250$ nm, en una vista de dos dimensiones.

La descripción anterior define el entorno en el que el Analizador de Modos nos presenta los resultados numéricos de la propagación del modo fundamental en una micro-nano fibra óptica. A continuación se muestran los resultados acerca de las variaciones de los parámetros propuestos al inicio de este capítulo, sin embargo, ya no se realiza una descripción detallada de los elementos gráficos como se realizó en la figura 4.1.

4.1.1. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 420 nm

A continuación se presenta el análisis en una micro-nano fibra óptica de índice escalonado. El núcleo (n_{nuc}) de la micro-nano fibra está hecho de SiO_2 que tiene un índice de refracción de 1.45 y como el revestimiento es el aire, entonces $n_{rev} = 1$, por lo que bien podría decirse

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA

que solo se trata de un alambre de SiO_2 que tiene diámetros sublongitud de onda. Es preciso mencionar que en todos los resultados presentados la micro-nano fibra óptica posee las características físicas antes mencionadas, a excepción de las pruebas realizadas en la sección 4.2.1, en donde el revestimiento de la micro-nano fibra óptica no es el aire, sino que se realiza una variación paulatina de n_{rev} .

El conjunto de figuras 4.2 representan el modo fundamental en una micro-nano fibra óptica de SiO_2 . La luz guiada a través de la fibra óptica es de 420 nm. Las variaciones en el diámetro de la fibra muestran la intensidad de la potencia propagada en la micro-nano fibra óptica visualizada en dos dimensiones (2D).

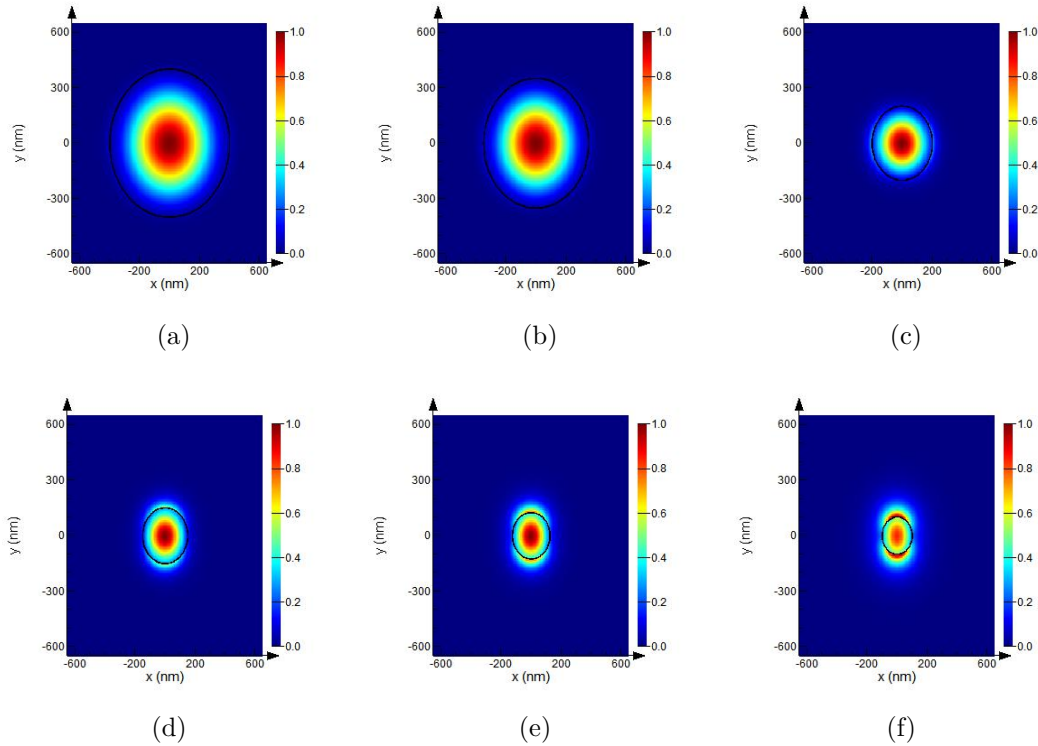


Figura 4.2: Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con: (a) $d=800$ nm, (b) $d=700$ nm, (c) $d=400$ nm, (d) $d=300$ nm, (e) $d=250$ nm, (f) $d=200$ nm, a longitud de onda de la luz de 420 nm.

El campo evanescente existente presente en la interfaz núcleo-revestimiento aumenta conforme disminuye el diámetro de la fibra óptica. Puede observarse en las figuras 4.2 (a), (b), (c) y (d) que el campo evanescente presente en la fibra es inferior en comparación con el perfil de campo evanescente presente en las figuras 4.2 (e) y (f). Este comportamiento reproduce los resultados teóricos presentados en [10]. Por ejemplo, en la figura 4.2 (c) $\lambda=420$ nm y $d=400$ nm, es decir $\lambda \approx d$, pero el campo evanescente es más notorio partir de que el diámetro de la fibra comienza a disminuir, por ejemplo a una fracción de longitud de onda, en este caso en la figura 4.2 (f) $d \approx \frac{\lambda}{2}$, en este caso, según los resultados teóricos establecidos en [10], cerca de la mitad de potencia se estaría propagando fuera del núcleo de la micro-nano fibra óptica.

4.1.2. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 550 nm

A continuación se presenta el modo fundamental guiado en la micro-nano fibra óptica cuando $\lambda = 550$ nm. Podemos observar en la Figura 4.3 que se presenta un campo evanescente notorio a partir de que $d=300$ nm, figura 4.3 (b), de esta manera, la longitud de onda de la luz guiada es casi dos veces mayor que el diámetro de la fibra, es decir, $\lambda \approx 2d$, rebasándose el límite de difracción de la luz, y dando lugar al fenómeno de ondas evanescentes, debido a tal fenómeno se observa que en las figuras 4.3 (a), la intensidad propagada fuera del núcleo es mínima, pues cuando el diámetro de la micro-nano fibra óptica es de 600 nm, aproximadamente el 90 % de la potencia se esta propagando en el núcleo, sin embargo, cuando el diámetro es menor que 400 nm el campo evanescente es notorio, por ejemplo, en la 4.3 (b) aproximadamente el 50 % de la potencia se propaga en el núcleo, pero es más notoria la cantidad de potencia propagada fuera del núcleo en las figuras 4.2 (c) y (d) en comparación con la figura 4.3(b).

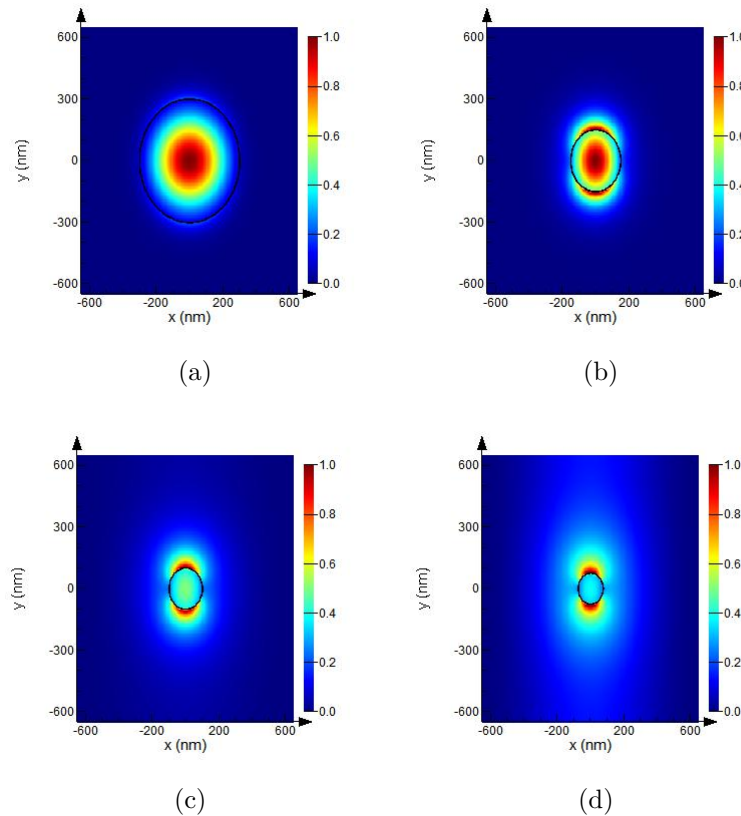


Figura 4.3: Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=600$ nm, (b) $d=300$ nm, (c) $d=200$ nm, (d) $d=150$ nm, a longitud de onda de la luz de 550 nm.

Se ha analizado hasta ahora el cálculo del modo fundamental en una micro-nano fibra óptica que varía sus dimensiones geométricas. Este tipo de análisis representa resultados

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA

significativos por el hecho de que a nivel simulación podemos predecir lo que ocurriría si se realizarán cambios de este tipo a nivel experimental. Los resultados entregados por el simulador son muy aproximados, y se obtienen con relativa facilidad, lo que nos permite un análisis extenso y detallado, por ejemplo, antes de la realización de un proceso experimental, se podrían realizar todas las pruebas que sean de interés, pues hacer cambios de este tipo en el sistema real implicarían cierto nivel de complejidad, o a veces resultaría imposible reproducir o implementar las condiciones creadas en el entorno de simulación.

4.1.3. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 633 nm

En la Figura 4.4 se presenta el modo fundamental en una micro-nano fibra óptica cuando la longitud de onda de la luz propagada a través de la fibra es de 633 nm y el diámetro de la fibra óptica varía desde los 450 nm hasta 200 nm.

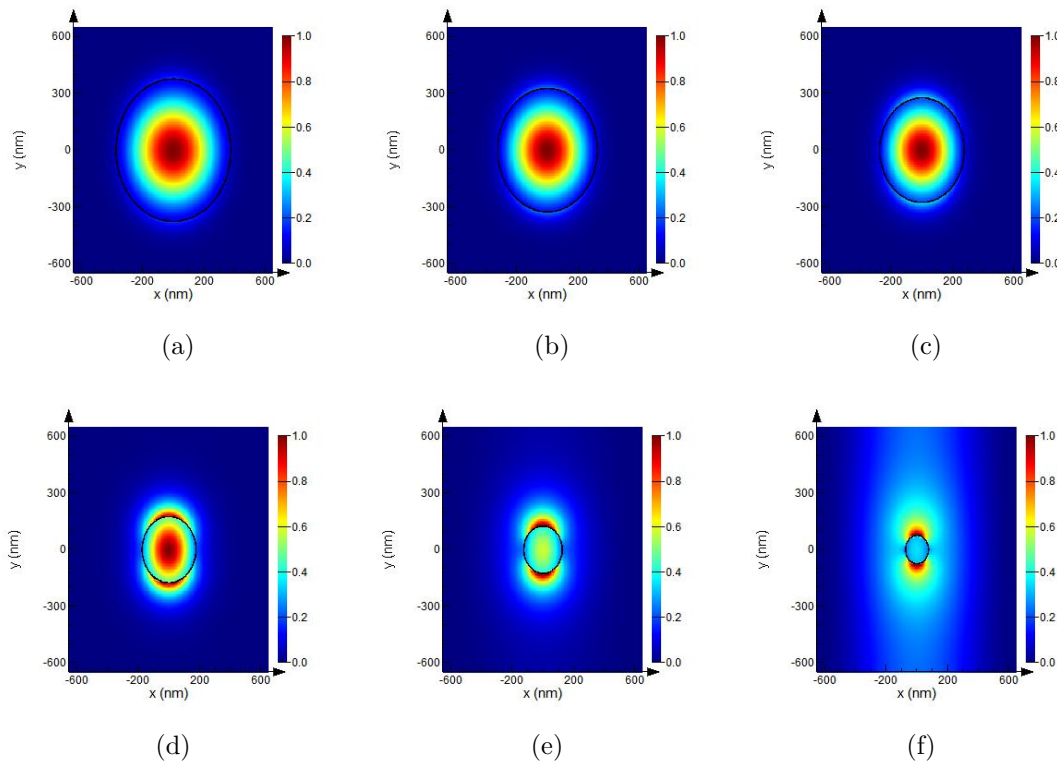


Figura 4.4: Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro : (a) $d=750$ nm, (b) $d=650$ nm, (c) $d=550$ nm, (d) $d=350$ nm, (e) $d=250$ nm, (f) $d=150$ nm, a longitud de onda de la luz $\lambda=633$ nm.

La intensidad del modo guiado en la micro-nano fibra óptica es representada en las figuras 4.4 (a)-(f), se observa que a partir de que la fibra tiene un diámetro menor a 550 nm existe un campo evanescente notorio en la fibra, figura 4.4 (d), de manera que en las figuras 4.4 (e) y (f) la cantidad de potencia propagada fuera del núcleo es aproximadamente más del 50 %.

Sin embargo, si el diámetro de la micro-nano fibra óptica es de 250 nm pero la longitud de onda de la luz guiada es ahora de 420 nm, como el resultado obtenido en la figura 4.2 (e), se observa que el campo evanescente en la micro-nano fibra óptica es mínimo a comparación del campo evanescente propagado en la figura 4.4 (e).

4.1.4. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 750 nm

En las Figuras 4.5 (a)-(d) se observa el cálculo gráfico del modo fundamental en una micro-nano fibra óptica cuando $\lambda = 750$ nm y se varia su diámetro de $d=700$ nm a $d=200$ nm.

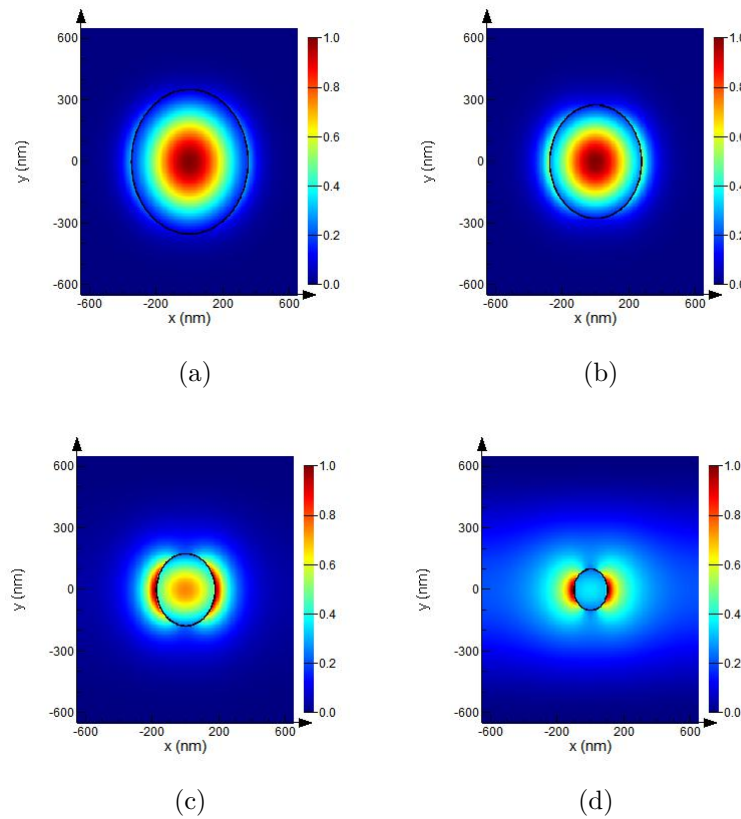


Figura 4.5: Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=700$ nm, (b) $d=550$ nm, (c) $d=350$ nm, (d) $d=200$ nm, a longitud de onda de la luz de 750 nm.

Si el diámetro de la fibra se reduce a $d=350$ nm la intensidad del campo evanescente en la micro-nano fibra óptica es notorio a diferencia de lo que se aprecia en la sección 4.1.3 en la Figura 4.4(d), en donde la micro-nano fibra óptica posee el mismo diámetro que la fibra de la Figura 4.5 (c). Por otro lado la potencia propagada en el núcleo de la micro-nano fibra es significativo (en la escala de intensidades se encuentra aproximadamente en 0.4 con un color azul claro) cuando el diámetro se reduce por debajo de los 300 nm, Figura 4.5 (c), de

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA

la misma manera que en la Figura 4.4 (d) donde $d=200$ nm. Sin embargo, en la sección 4.1.1 cuando la longitud de onda de la luz guiada a través de la fibra es de 420 nm, y posee un diámetro $d=250$ nm (figura 4.2 (e)) la cantidad de potencia propagada en el núcleo aún es significativa, pues en la escala de intensidades se encuentra aún entre 0.6 y 0.7.

Sin duda la variación de los parámetros geométricos y físicos, como lo es el diámetro de la en la fibra óptica y la longitud de onda de la luz guiada a través de ella, muestra como se rebasa el límite de difracción de la luz, dando lugar a un campo evanescente que envuelve al núcleo de la fibra, siendo más notorio mientras más se reduce el diámetro de la fibra óptica o se aumentaba la longitud de onda de la luz guiada en la micro-nano fibra óptica, manteniendo un parámetro fijo y variando otro.

4.1.5. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 900 nm

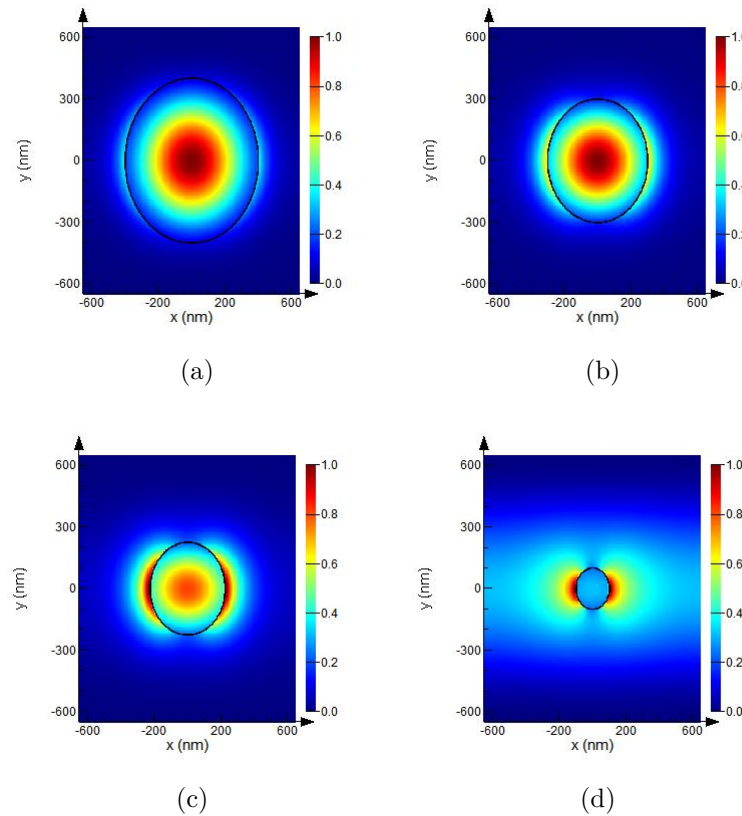


Figura 4.6: Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=800$ nm, (b) $d=600$ nm, (c) $d=450$ nm, (d) $d=200$ nm, a una longitud de onda de la luz de 900 nm.

En la figura 4.6 se aprecia gráficamente la potencia propagada en una micro-nano fibra óptica cuando $\lambda=900$ nm. El diámetro de la micro-nano fibra óptica varía de 800 nm a 200 nm. Como se aprecia en la figura 4.6 (b), cuando el diámetro de la fibra óptica es de 600 nm,

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA

aproximadamente el 80 % de la potencia se propaga en el núcleo, sin embargo como puede apreciarse en la figura 4.6 (d), aproximadamente el 70 % de la potencia se propaga como ondas evanescentes, o bien por ejemplo, en la figura 4.6 (c) existe potencia propagada en el núcleo de la fibra óptica y potencia propagada como ondas evanescentes, aproximadamente un 50 % respectivamente.

4.1.6. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 1550 nm

La mayoría de los equipos de fuentes láseres trabaja en rangos de longitudes de onda de 633 nm (subsección 4.1.5) y 1550 nm, debido a esto, resulta adecuado brindar un enfoque tecnológico para tener una noción clara de lo que se debería esperar si se desarrollará un prototipo experimental que funcionará mediante el equipo de fuentes láseres, he aquí la importancia de abordar longitudes de onda específicas del espectro electromagnético.

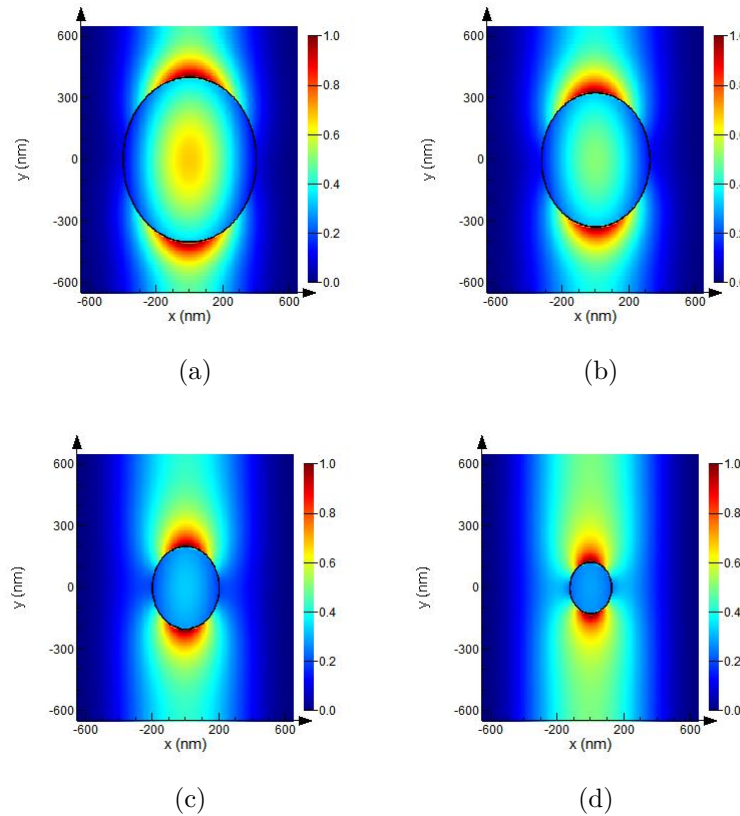


Figura 4.7: Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica con diámetro: (a) $d=800$ nm, (b) $d=650$ nm, (c) $d=500$ nm, (d) $d=400$ nm, (e) $d=250$ nm y (e) $d=400$ nm a una longitud de onda de la luz de 1550 nm.

En la figura 4.7 se puede apreciar la potencia propagada como ondas evanescentes en la micro-nano fibra óptica una longitud de onda de la luz guiada a través de ella de 1550 nm,

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA

mientras se realiza una variación en el diámetro de la fibra de 800 nm a 250 nm. Es notorio que a partir de que la micro-nano fibra óptica tiene un diámetro de 800 nm (Figura 4.7 (a)) que aproximadamente el 40 % de la potencia se esta propagando en el núcleo, y a medida que se reduce el diámetro de la fibra óptica, la potencia propagada en el núcleo es $\approx 30\%$, incluso en la figura 4.7 (d) se observa que aproximadamente más del 90 % de la potencia se propaga como ondas evanescentes.

Con los resultados presentados hasta el momento se observaron las variaciones realizadas al diámetro de la micro-nano fibra óptica, desde $d=850$ nm hasta $d=150$ nm manteniendo fija cierta longitud de onda de la luz guiada λ . En este caso, se analizó el campo guiado y radiado en una micro-nano fibra óptica dieléctrica de índice escalonado, es decir, puesto que la micro-nano fibra óptica tiene como revestimiento el aire, el cambio de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento es abrupto.

4.2. Campo evanescente en una micro-nano fibra óptica

Lumerical ofrece otra manera de observar la propagación de la luz en guías de onda. Mediante el uso de FDTD se analizó la propagación de la luz con una longitud de onda de 633 nm en una micro-nano fibra óptica. Desde una perspectiva transversal, se observa en la figura 4.8 una micro-nano fibra óptica dieléctrica que tiene como revestimiento el aire, se muestra la vista desde el plano xz. El conjunto de figuras 4.8 muestra el campo formado en la interfaz núcleo-revestimiento cuando se varía el diámetro de la fibra. Se emplearon los monitores de frecuencia para calcular y capturar el campo propagado en la interfaz. Se aprecia que la potencia propagada fuera de la fibra aumenta conforme disminuye el diámetro del núcleo de la fibra d_n (en donde el subíndice n indica que se trata del diámetro del núcleo de la fibra), figuras 4.8 (a)-(f).

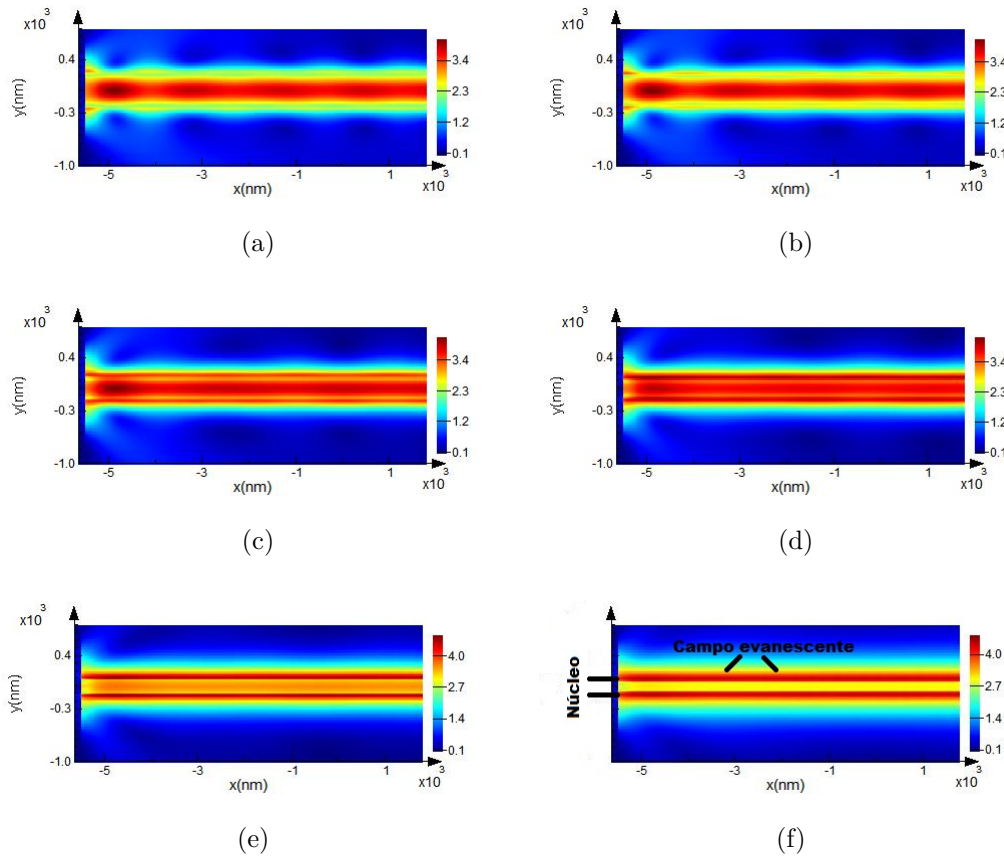


Figura 4.8: Campo evanescente en una fibra nanométrica de dióxido de silicio, en donde el diámetro es: a)450 nm, b)400 nm, c)300 nm, d) 250 nm, e)200 nm y f) 150 nm.

Las micro-nano fibras ópticas son utilizadas en aplicaciones de sensado debido a las propiedades, como los son sus intensos campos evanescentes. En las figuras 4.8 (e) y (f), se tiene mayor sensibilidad debido al gran campo evanescente que envuelve al núcleo, logrando por ejemplo que un ligero cambio en el índice de refracción en el medio circundante al

revestimiento pueda ser detectado.

4.2.1. Gráficas de mérito en una micro-nano fibra óptica

Además del análisis modal en una micro-nano fibra óptica se obtuvieron algunos gráficos para calcular el índice efectivo, la velocidad de grupo, el retardo de grupo, las pérdidas, la dispersión y la constante de propagación β en función de la longitud de onda. La fibra posee un diámetro de 200 nm y se varía la longitud de onda de $\lambda=550$ nm hasta los $\lambda=800$ nm.

Desde el entorno de simulación del Analizador de Modos los parámetros son obtenidos a partir de un barrido en la longitud de onda, lo que nos permite conocer como es que se incrementa la distorsión mientras la señal óptica viaja en la fibra.

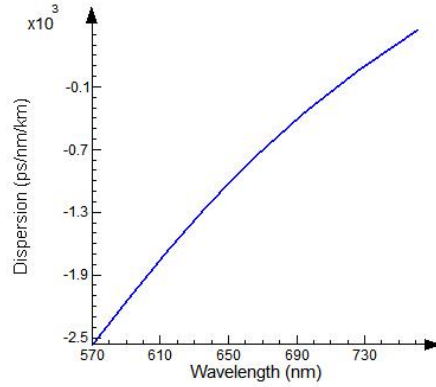
A continuación presentamos el análisis de los gráficos obtenidos en la Figura 4.9.

- La Figura 4.9 (f) nos indica el índice eficaz para cada modo calculado en función de la longitud de onda. En este caso, el *índice efectivo* para el modo fundamental tiene un comportamiento lineal con pendiente negativa, decrece desde 1 hasta 0, mientras λ se incrementa de $\lambda=550$ nm a $\lambda=880$ nm.
- La Figura 4.9 (e) define la pérdida modal, se muestra un comportamiento constante en 0. Por otro lado también se puede encontrar la ganancia, aunque se espera un comportamiento similar.
- El parámetro β se representa en la Figura 4.9 (b), observamos que tiene un comportamiento casi lineal que decrementa conforme aumenta λ .
- La Figura 4.9 (c) representa el *índice de grupo*, el cual tiene un comportamiento parabólico, pues partir de $\lambda=550$ nm comienza a disminuir y llega a un mínimo cuando la longitud de onda se aproxima a $\lambda=720$ nm.
- Para el modo fundamental la *velocidad de grupo* representada en el gráfico de la Figura 4.9 (d) aumenta con la longitud de onda, en este sentido, el incremento es parabólico, llegando a una velocidad de grupo máxima cuando $\lambda \approx 720$ nm.
- En la gráfica de la Figura 4.9 (a) se aprecia que la dispersión varia linealmente con la longitud de onda λ , en este sentido a mayor longitud de onda λ mayor será la dispersión en la guía de onda.

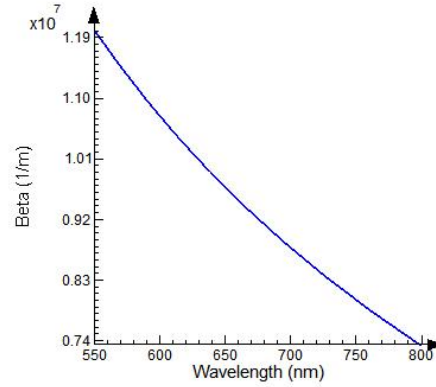
Como la dispersión depende de la geometría de la fibra, en los resultados obtenidos las dimensiones de la fibra son inferiores a la longitud de la onda propagada λ .

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

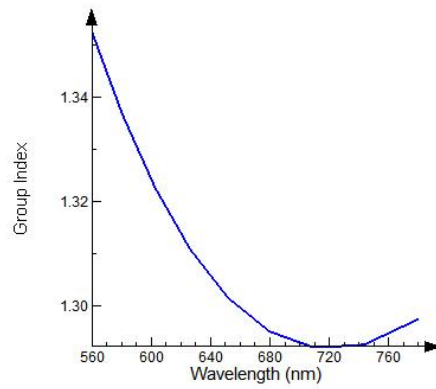
4.2. CAMPO EVANESCENTE EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA



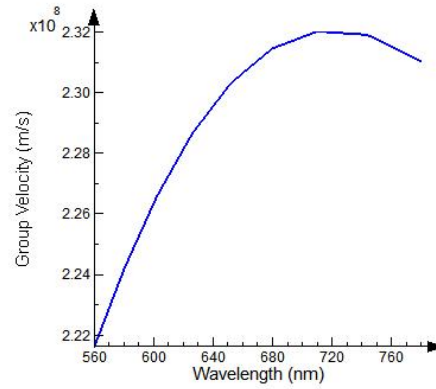
(a) Gráfica de dispersión



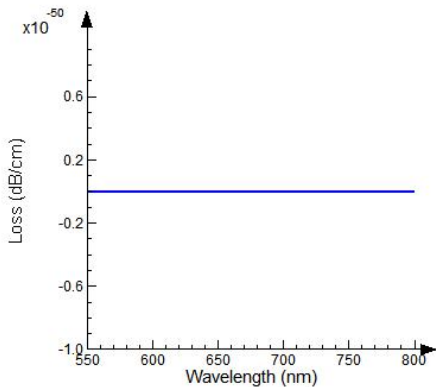
(b) Gráfica del parámetro beta β



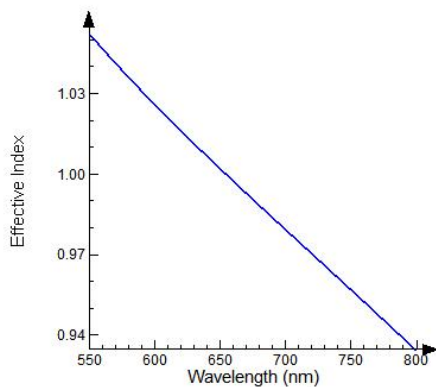
(c) Gráfica de índice de grupo



(d) Gráfica de velocidad de grupo



(e) Gráfica de pérdida



(f) Gráfica del índice efectivo

Figura 4.9: Gráfica de parámetros de: dispersión, constante de propagación β , retardo de grupo, velocidad de grupo, pérdidas e índice efectivo, para una micro-nano fibra óptica con un núcleo de dióxido de silicio y como recubrimiento el aire, con un diámetro de 200 nm, variando la longitud de onda de trabajo de 500 a 800 nm

4.3. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA: VARIACIÓN EN EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

El análisis gráfico presentado indica los parámetros de dispersión en una micro-nano fibra óptica, debido a que la fibra mono-modo solo confina el 80 por ciento de la potencia en el núcleo, y el 20 por ciento de la luz propagada en el revestimiento viaja más rápido que la luz confinada en el núcleo. Dependiendo de la aplicación de este tipo de fibras este análisis brinda la información requerida para determinar la distorsión de la señal óptica a través de un barrido de frecuencia o de la longitud de onda.

4.3. Análisis modal en una micro-nano fibra óptica: variación en el índice de refracción

En la sección 4.1 se obtuvo el cálculo del modo fundamental de una fibra nanométrica de índice escalonado variando su diámetro y la longitud de onda guiada en la fibra. Ahora se analizan los cambios en el índice de refracción del recubrimiento para poder observar el efecto que se produce cuando el índice de refracción del revestimiento no tiene un cambio abrupto con respecto al índice de refracción del núcleo.

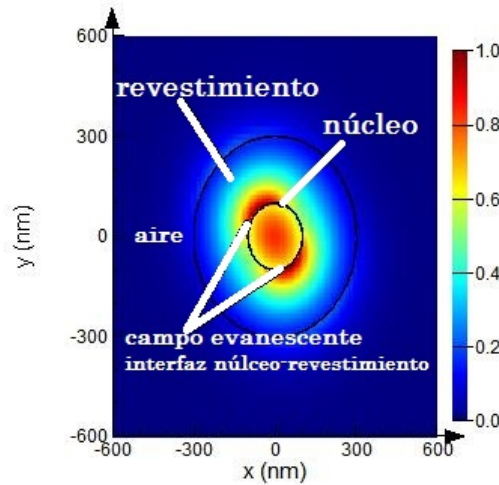


Figura 4.10: Descripción del entorno gráfico para el análisis modal, vista en dos dimensiones.

El cambio en el índice de refracción en el revestimiento analizado a continuación. Gracias a la potencialidad del simulador numérico empleado, se automatizó la variación de los parámetros deseados para la generación del cálculo del modo fundamental en la fibra, los tres parámetros sobre los que se realizó un barrido automático fueron: el índice de refracción del revestimiento, el diámetro del núcleo de la fibra y la longitud de onda de la luz propagada en la fibra. Se generaron más de 300 archivos, de los cuáles se muestran algunos resultados de interés.

4.3. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA: VARIACIÓN EN EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

4.3.1. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 420 nm

En la Figura 4.11 la fibra nanométrica conserva las mismas dimensiones geométricas, en este caso tiene un diámetro en el núcleo de 200 nm, el diámetro del revestimiento es de 500 nm y la longitud de onda de operación es de 420 nm, los cambios realizados fueron en el índice de refracción del revestimiento, puesto que el índice de refracción del núcleo es de $n = 1.45$, se propuso variar el índice de refracción en el recubrimiento desde 1.1 hasta 1.38 debido a que el aproximarnos más al índice de refracción del núcleo no tendría gran relevancia). Es interesante el comportamiento cuando se varía poco a poco el índice de refracción en el revestimiento, por ejemplo cuando el índice de refracción cambia drásticamente como en la Figura 4.10 (a) el campo evanescente es notorio en la interfaz núcleo-revestimiento, pero a medida que el índice de refracción aumenta el campo evanescente es menos intenso en la interfaz núcleo-revestimiento, como puede observarse en las figuras 4.11 (e) y (f) que tienen un índice de refracción de 1.35 y 1.38 respectivamente.

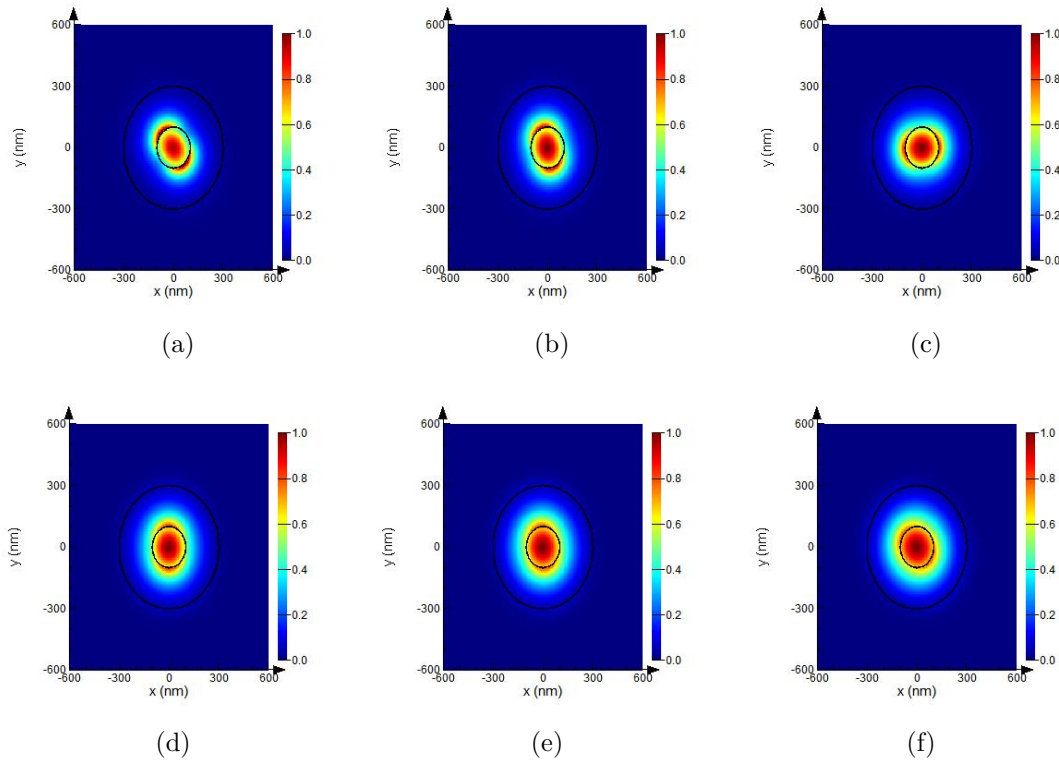


Figura 4.11: Modo fundamental de una fibra nanométrica con un índice de refracción en el núcleo de 1.45 y en el revestimiento un índice de refracción: (a) 1.10, (b) 1.20, (c) 1.25, (d) $n = 1.30$, (e) $n = 1.35$ y (f) $n = 1.38$, a longitud de onda de la luz de 420nm.

Ahora se presentan resultados en los que se aprecia variaciones más representativas con respecto al cambio en el índice de refracción.

4.3. ANÁLISIS MODAL EN UNA MICRO-NANO FIBRA ÓPTICA: VARIACIÓN EN EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

4.3.2. Modo fundamental en una micro-nano fibra óptica a una longitud de onda de la luz guiada de 750 nm

En la subsección 4.1.4 se obtuvo el modo fundamental en un fibra con un diámetro de 250 nm, en donde la longitud de onda de la luz propagada fue de 750 nm, en realidad tal resultado es muy próximo al modo fundamental calculado en la figura 4.12 (a), esto se esperaba debido q que el revestimiento tiene un índice de refracción muy cercano al del aire, en este caso $n = 1.1$, sin embargo se puede observar que mientras aumentamos el índice de refracción en el revestimiento, el campo evanescente presente en la interfaz núcleo-revestimiento es intenso además de que la intensidad propagada en el núcleo también es mayor (Como se observa en las figuras 4.12 (b), (c), (d), (e) y (f)).

Podemos concluir entonces que la variación en el índice de refracción en el revestimiento n_r cambia las propiedades de propagación en la fibra, por lo que podemos determinar el índice de refracción que sería óptimo dependiendo las características que deseemos tenga la fibra nanométrica, por ejemplo, en base al comportamiento establecido anteriormente podemos decir que se necesita que la fibra tenga un cambio abrupto en el índice de refracción del revestimiento n_r para que la mayor intensidad se propague en la interfaz núcleo-revestimiento.

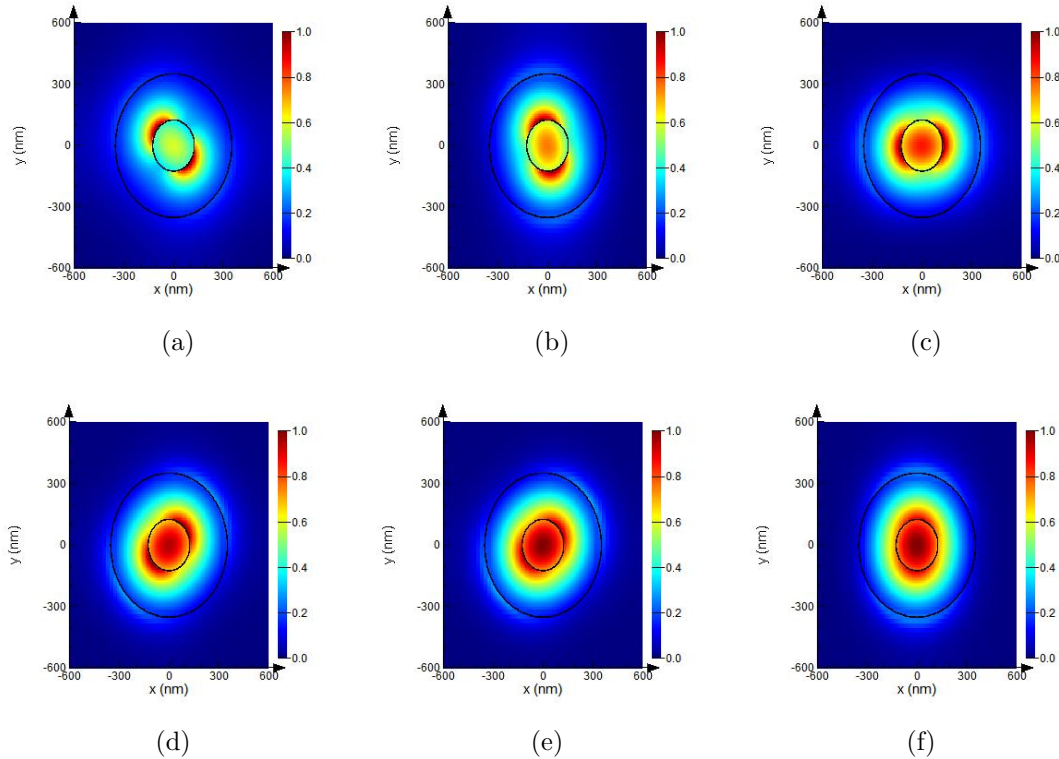


Figura 4.12: Modo fundamental de una fibra nanométrica con un índice de refracción en el núcleo 1.45 y en el revestimiento un índice de refracción: (a) $n_r = 1.10$, (b) $n_r = 1.20$, (c) $n_r = 1.25$, (d) $n_r = 1.30$, (e) $n_r = 1.35$, (f) $n_r = 1.38$, a longitud de onda de la luz $\lambda = 750nm$.

En la sección 4.1 y en la sección 4.3 se presentaron los resultados numéricos acerca del

cálculo modal en una fibra nanométrica de índice escalonado en la que se varió paulatinamente el índice de refracción en el revestimiento adicionalmente se hicieron variaciones en el diámetro de la fibra y la longitud de onda de operación.

Los resultados que se han presentado muestran un estudio puramente gráfico que describe la intensidad de propagación (guiada y radiada) en una micro-nano fibra óptica, comprobándose los resultados reportados en la literatura, en los cuáles además se registra un estudio analítico de parámetros de interés como la cantidad de potencia propagada en el núcleo de la fibra óptica, o la relación entre el índice de refracción del revestimiento y la potencia propagada fuera de la fibra óptica. La diferencia del presente trabajo es que se presenta de manera detallada el estudio gráfico de la propagación en guías de onda del rango visible al infrarrojo del espectro electromagnético, además como en la literatura revisada, se considera el aspecto tecnológico, debido a que la mayoría del equipo (por ejemplo fuentes láseres, como los láseres de He-Ne) trabaja en la tercera ventana de las comunicaciones ópticas, en este caso $\lambda = 1550$ nm, o en el rango visible ($\lambda = 633$ nm), en este sentido, y atendiendo a las necesidades y a la futura implementación de guías de onda sublongitud de onda, se propuso analizar el comportamiento del campo evanescente en una micro-nano fibra óptica propagando luz con longitudes de onda de hasta 1550 nm e incluyendo diámetros de la fibra de hasta los 200 nm, puesto que mediante las técnicas de fabricación de micro-nano alambres de fibra óptica se han obtenido fibras de hasta 150 nm de diámetro (por medio de la técnica *flame-brushing* por ejemplo).

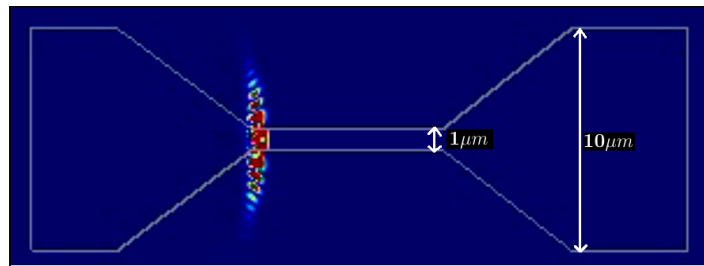
Hasta ahora las fibras analizadas caen dentro de la categoría de nanoalambres de fibra, a continuación se presenta la visualización de la progresión de la luz en un tipo de fibra llamada *fibra cónica* debido a la forma que presenta.

4.4. Propagación de la luz en una fibra cónica

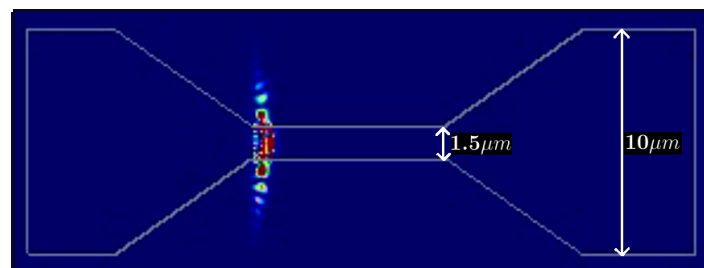
Las fibras cónicas (en inglés conocidas como fibras “*tapers*”) son llamadas también fibras bicónicas cuando conservan las mismas dimensiones en los extremos (diámetros mucho mayores que en la parte adelgazada) y la parte central de la fibra tiene diámetros de micro ó nanómetros. Las figuras siguientes son monitores de película que pueden observarse en el archivo digital PDF anexo.

Mediante monitores de película se capturó en el dominio temporal la propagación de la luz en la fibra cónica, es entonces que la progresión de la luz en la fibra se almacena como un archivo de vídeo, y las imágenes que se captaron representan los instantes de mayor interés para nosotros. La fuente de luz se colocó en un extremo de la fibra cónica, de manera que la luz se propagará en la fibra de un extremo al otro, como se aprecia en la figura 4.13 (a), la fibra cónica ha sido adelgazada hasta 1 μm y en los extremos posee un diámetro de 10 μm , se observa claramente la gran parte del campo radiado en la interfaz del núcleo cuando la luz se propaga hacia la zona adelgazada. De manera similar se presenta el mismo fenómeno en las figuras 4.13 (b) y (c), aunque con una intensidad diferente, debido a que la geometría de la fibra cambia, pues el diámetro de la parte central de la fibra es mayor, haciendo que se confine mayor parte de la luz en el núcleo debido solo a las dimensiones de la fibra.

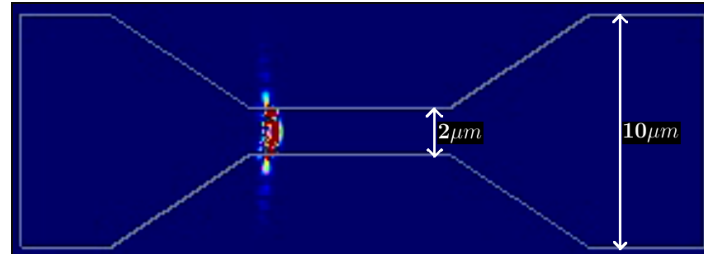
CAPÍTULO 4. RESULTADOS
4.4. PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN UNA FIBRA CÓNICA



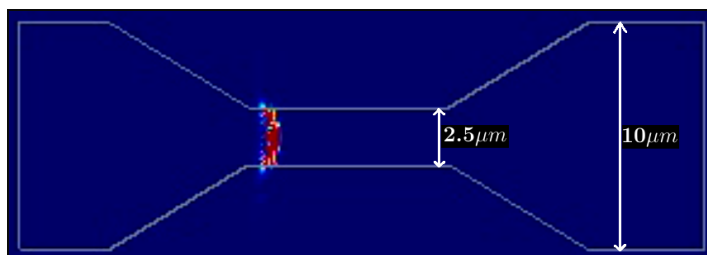
(a) Monitor de película: diámetro de la región reducida $d=1 \mu\text{m}$



(b) Monitor de película: diámetro de la región reducida $d=1.5 \mu\text{m}$



(c) Monitor de película: diámetro de la región reducida $d=2 \mu\text{m}$



(d) Monitor de película: diámetro de la región reducida $d=2.5 \mu\text{m}$

Figura 4.13: Vista de una sección transversal de la fibra *taper* (propagación mediante monitor de película).

El análisis anterior vuelve a confirmar el comportamiento de la luz en este tipo especial de fibras nanométricas, como se mencionó en la sección 4.2, la fibra posee una excelente

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.4. PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN UNA FIBRA CÓNICA

sensibilidad cuando el diámetro de la fibra es mucho menor comparado con la longitud de onda guiada en la fibra, en este caso, la región reducida presenta tal comportamiento, y se tienen intensos campos evanescentes que como se ha venido mencionando son actualmente aprovechados en diversas aplicaciones, por ejemplo el sensado óptico.

Los resultados anteriores involucraron el análisis de fibras nanométricas donde se propuso la variación en el índice de refracción en el revestimiento. Además de que se realizaron variaciones en 2 parámetros más: el diámetro del núcleo de la fibra y en la longitud de onda de la luz guiada. Por último se analizaron distintas perspectivas para visualizar la propagación de la luz en fibras nanométricas, así como en fibras cónicas.

La fibra óptica y los intensos campos evanescentes. El trabajo presentado con anterioridad permite demostrar como es que los intensos campos evanescentes se toman como ventaja para el sensado mediante fibras ópticas. Son actualmente investigados los sensores de fibra óptica [10] que poseen diámetros menores que la longitud de onda que se propaga a través de la fibra, y se ha demostrado que los campos evanescentes son más intensos bajo ciertas condiciones, como se estudio en este trabajo de tesis, por lo que puede establecerse una relación entre la intensidad de dichos campos evanescentes y la sensibilidad del sensor o el tiempo de respuesta del mismo.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis ha sido estudiada la propagación de la luz a frecuencias ópticas en alambres sublongitud de onda o bien micro-nano fibras ópticas mediante un análisis en el software numérico FDTD y el Analizador de Modos. Es importante mencionar que mediante los recursos disponibles en estas herramientas de simulación fue posible automatizar el diseño de dichas guías de onda ópticas para realizar las variaciones físicas y geométricas propuestas.

Se estudio el modo fundamental de propagación en una micro-nano fibra óptica de índice escalonado, en la cual se hicieron variaciones en el índice de refracción del recubrimiento n_r , en el radio de la núcleo de la fibra, r , y en la longitud de onda de la luz guiada, λ . Las simulaciones generadas a partir de dichas variaciones nos indicaron de manera gráfica mediante la visualización en dos dimensiones (2D) el comportamiento de la luz guiada en la fibra, lo que nos indicó que los campos evanescentes (potencia propagada fuera del núcleo de la fibra) son enteramente dependientes de la longitud de onda de la luz guiada, λ y del diámetro de la fibra d , validando con las gráficas de mérito obtenidas en los resultados, que, con dichos cambios puede modificarse la velocidad de grupo de los modos guiados, por lo tanto se puede manipular la dispersión en una micro-nano fibra óptica en comparación de una fibra estándar monomodal. Además se analizó el efecto de variar el índice de refracción del recubrimiento de la fibra, n_r , de forma paulatina, este tipo de variación influye notablemente al igual que mencionamos antes, en la propagación de los modos guiados y en la presencia de un campo evanescente más intenso.

Las guías de onda sublongitud de onda estudiadas en este trabajo de tesis fueron abordadas mediante diferentes perspectivas empleando herramientas de simulación numérica, lo que permitió analizar estructuras complejas que involucran un tratamiento analítico robusto. Adicionalmente, los resultados presentados permiten dar aplicaciones ópticas a escala nanométrica, por ejemplo en el sensado óptico, que relaciona a los intensos campos evanescentes asociados a las micro-nano fibras ópticas.

Actualmente el campo de investigación de la tecnología de sensado óptico con micro-nano fibras ópticas forma un campo de investigación ampliamente estudiado.

Un resultado importante es que se puede, con la variación de los parámetros antes mencionados, modificar la cantidad de ondas evanescentes que se presentan. Cuestión importante para aplicaciones futuras en el área de sensado óptico, por ejemplo.

Bibliografía

- [1] Limin Tong, Michael Sumetsky, “Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Fibers”, Springer, Cap. 1-2, 2010.
- [2] “Nanociencia y Nanotecnología:entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro”, FECYT(Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología), Gobierno de España, pp. 247.
- [3] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communications Systems”, Wiley-Interscience, Tercera edición, pp. 24-55, 2002.
- [4] “Reference Guide to Fiber Optic Testing”, JDSU, Second edition, Volume 1.
- [5] Liming Tong, Fei Zi, Xin Guo, Jingyi Lou, “Optical microfibers and nanofibers: A tutorial”, pp. 4641-4647, Vol. 285, 2012.
- [6] Liming Tong, Jingyi Lou y Eric Mazur, “Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides”, Optics Express, Vol.12, No.6, pp. 1025-1035, 2004.
- [7] Liming Tong, Rafael R. Gatass, Jonathan B. Ashcom, Salling He, Jingyi Lou, Mengyan, Iva Maxwell y Eric Mazur, “Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding”, Nature, Vol.426, pp. 816-819, 2003.
- [8] Pinghui Wu y Zhangrong Mei, “Optical Microfibers and Nanofibers Fabrication, Properties and Applications”, Vol.12, pp. 2728-2730, 2012.
- [9] George Y. Chen, Ming Ding, Trevor P. Newson y Gilberto Brambilla, “A review of microfiber and nanofiber based optical sensors”, Nanophotonics, pp. 407-428, 2013.
- [10] George Y. Chen, Ming Ding, Trevor P. Newson y Gilberto Brambilla, “A review of microfiber and nanofiber based optical sensors”, The Open Optics Journal, Vol.7, pp. 32-57, 2013.
- [11] Jingyi Lou, Yipei Wang y Liming Tong, “Microfiber optical sensors: A review”, Sensors, Vol.14, pp. 5823-5844, 2014.
- [12] Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu “Introduccion to Finite Elements in Engineering”, Editorial Prentice Hall, Tercera edición, pp. 1-5, 2002.

- [13] Jaime Barceló, “Simulación de Sistemas Discretos”, Isdefe, Primera edición, España, pp. 247, 1996.
- [14] Lumerical, “Página de productos Lumerical”, [En línea], (Septiembre 2014). www.lumerical.com/tcad-products
- [15] Comsol Multiphysics, “Página de productos Comsol”, [En línea], (Noviembre 2014). www.comsol.com/products
- [16] MathWorks MatLab, “Página de productos Mathworks”, [En línea], (Noviembre 2014). www.mathworks.com/products/matlab/
- [17] John B. Schneider “Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method”, pp. 7-10, 2014.
- [18] Stephen D. Gedney, “Introduction to the Finite-Difference Time-Domain Method (FDTD) to Method for Electromagnetics ”, pp. 1-14, 2011.
- [19] Allen Taflove, “Advances in FDTD Computacional Electrodynamics”, 2013.
- [20] Allen Taflove, “Computacional Electrodynamics: the finnite-difference time-domain method”, pp. 51-76, 1995.
- [21] Dennis M.Sullivan, “Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method”, IEEE Press Editorial, pp. 51-55, 2000.
- [22] Jean-Pierre Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves”, Journal of Computational Physics 114, pp. 185-200, 2004.
- [23] Hecht Eugene, “Óptica”, Tercera edición, Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, Cap. 4-5, 2000.
- [24] Matt Young, “Optics and lasers: including Fibers and Optical Waveguides”, Fifth edition, Springer Editorial, 498 pp.
- [25] “Evanescent wave microscopy”, Department of Physics, pp. 10-13, 2003.
- [26] Senior, John M. , “Optical Fiber Communications”, Prentice-Hall International, pp. 11-57, 1985.
- [27] Sophocles J. Orfanidis, “Electromagnetic Waves and Antennas”, ECE Department, Cap. 9, 2008.
- [28] Sadiku, “Elementos de Electromagnetismo”, Editorial Continental, Segunda edición México, pp. 593-618, 1998.
- [29] Christopher R Doerr, y Herwing Kogelnik, “Dielectric waveguide theory”, Journal of lightwave technology., vol.26, pp. 1176-1187, Mayo 2008.
- [30] Marcuse Dietrich, “Theory of dielectric optical waveguides”, Editorial Academic Press, Segunda Edición, pp. 1-3, 1991.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [31] María L. Calvo y Vasudevan Lakshminarayanan, “Optical Waveguides: from theory to applied technologies”, Editorial CRC Press, Cap. 1, pp. 424, 2007.
- [32] Masanori Koshiba, “Optical Waveguide Analysis”, Editorial Board, pp. 1-13, 1990.
- [33] David M. Pozar, “Microwave engineering”, Editorial John Wiley and Sons, Cuarta Edición, 2012.
- [34] William H. Hayt, John A. Buck, “Teoría Electromagnética”, Editorial McGrawHill, Séptima edición, pp. 490-511, 2006.
- [35] Ajoy Ghatak, K. Thyagarajan y Nick Massa, “Fundamentals of photonic”, Cap. 1.7-1.8, 2000.
- [36] RP Photonics Encyclopedia: Encyclopedia of Lasers Physics and Technology, “Fibers”, En línea, (Septiembre 2014). www.rp-photonics.com/fibers.html
- [37] Bahaa E.A.Saleh, Carl Teich, “Principles of Photonics”, Editorial John Wiley & Son, Cap.8, 1991.
- [38] “Understanding Fiber Optics”, Amphenol Fiber Optics Solutions, pp. 1-3, 2004.
- [39] Keiser Gerd , “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill International, Cuarta edición, 2008.
- [40] Erwin A. Martí P, “Nanofotónica en medios discretos”, Spinor, pp. 13-15, 2015.
- [41] “A 3D FDTD code implemented in MATLAB”, Matlab FDTD, pp. 2-10, 2011.

Parte I
Apéndice

Apéndice A

El Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo

FDTD (por sus siglas en inglés), es el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo, fue originalmente propuesto por Kane S. Yee en un artículo que publicó en el año de 1966, en el cuál se asentó un método para discretizar las ecuaciones de Maxwell aproximando un sistema de ecuaciones en derivadas parciales en el dominio temporal y espacial.

La trascendencia del método propuesto por Yee fue el análisis que presentó al obtener una precisión de segundo orden al escalar tanto el campo eléctrico y magnético tanto en el espacio como en el tiempo. Obtuvo una solución completa para problemas en tres dimensiones (3D), a la vez que validó la resolución de problemas en dos dimensiones (2D). Este método no fue muy extendido, sino hasta una publicación realizada por Taflove y Brodwin quienes emplearon el método de Yee para hallar la dispersión en cilindros dieléctricos, y en 1977, Holland hizo un tratado en el que revela las ventajas de manera concisa de la utilización del método de Yee [18].

El método FDTD tuvo un crecimiento paralelo junto con los avances en la tecnología de la computación, y ganó popularidad puesto que permitía abordar los problemas de una manera sencilla. Además el método FDTD representa un algoritmo rápido.

A.1. Descripción de FDTD

El método de diferencias finitas fue estudiado desde mediados del siglo pasado, y es muy utilizado debido a que permite abordar problemas complejos que involucran la resolución de ecuaciones diferenciales, ordinarias y parciales. No fue si no hasta hace un cuarto del siglo pasado que se introdujo como tal el método del elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés) convirtiéndose en una alternativa viable pues ofrece algunas ventajas sobre FDTD en algunas aplicaciones.

FDTD y FEM son dos de los métodos numéricos más empleados en la resolución de diversos tipos de problemas, aunque no para las mismas aplicaciones, por ejemplo, para la solución de problemas electromagnéticos se emplea el método FDTD en el software numérico de simulación Lumerical. Ambos métodos presentan ventajas uno con respecto del otro pero

**APÉNDICE A. EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN EL
DOMINIO DEL TIEMPO
A.2. ALGORITMO DE YEE**

para distintas aplicaciones.

Por un lado el método del elemento finito que soluciona (o en su caso aproxima) un sistema de ecuaciones diferenciales que describen un problema de carácter físico. Este método requiere que el problema este definida en una región geométrica, para ser subdividido en un número de regiones finitas y lo suficientemente pequeñas, por lo que se forma un tipo de red, que inglés es conocida como una "mesh". Por otro lado el método de diferencias finitas consiste en una malla de filas y columnas de líneas ortogonales, lo anterior es la característica que diferencia al método del elemento finito, ya que en FEM, las divisiones son únicas y no son necesariamente ortogonales.

A.2. Algoritmo de Yee

Como se mencionó al principio del apéndice, en 1966, Kane Yee propuso un conjunto de ecuaciones basadas en diferencias finitas para la resolución de las ecuaciones de Maxwell. Muchos métodos de mallado para la resolución de dichas ecuaciones han sido propuestos desde que se dio a conocer el método de Yee, sin embargo, el método de diferencias finitas ha tenido un gran impacto consolidándose con un método trascendente ya tradicional. Para ello, en la región tridimensional de interés se hace un mallado de celdas cúbicas coordenadas. Así:

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$$

Si tenemos que Δx , Δy y Δz son los incrementos espaciales. Cada función espacial y temporal se escribe como:

$$F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F^n(i, j, k)$$

Para el cálculo de las derivadas temporales y espaciales de las ecuaciones de Maxwell se definen diferencias finitas centradas en las mallas traslapadas, una ventaja de utilizar las diferencias centradas es que se tratan de diferencias de segundo orden, lo que permite mas precisión en los incrementos discretos, entonces:

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i + 1/2, j, k) - F^n(i - 1/2, j, k)}{\Delta x} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (\text{A.2})$$

Utilizando la ecuación A.1 se actualiza el campo \mathbf{E} en cada instante de tiempo n y con la ecuación A.2 se actualiza el campo magnético \mathbf{B} en cada instante de tiempo $(n+1/2)$. El método se basa en utilizar las ecuaciones anteriores para calcular las derivadas de los campos electromagnéticos. Las mallas empleadas para evaluar \mathbf{E} y \mathbf{B} en el espacio también están escalonadas: el vértice de un cubo perteneciente a una malla que se encuentra en el centro de un cubo perteneciente a la otra malla, como se muestra en la figura A.2.

Al aplicar el método a las ecuaciones de Maxwell, entonces se obtendría un conjunto de ecuaciones expresadas en diferencias finitas [20].

APÉNDICE A. EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN EL
DOMINIO DEL TIEMPO
A.3. CAPA DE ACOPLAMIENTO PERFECTO

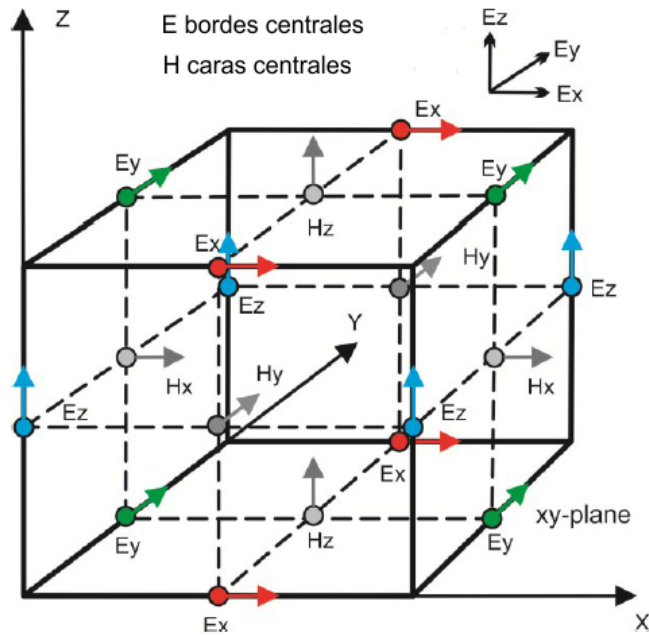


Figura A.1: Celda unidad Yee [41] .

A.3. Capa de Acoplamiento Perfecto

Del electromagnetismo surge el establecimiento de las condiciones de frontera indicadas para una superficie conductora, en este caso se debe cumplir que las componentes tangenciales del campo eléctrico se anulen en la superficie y que la componente perpendicular del campo magnético se anule en la superficie.

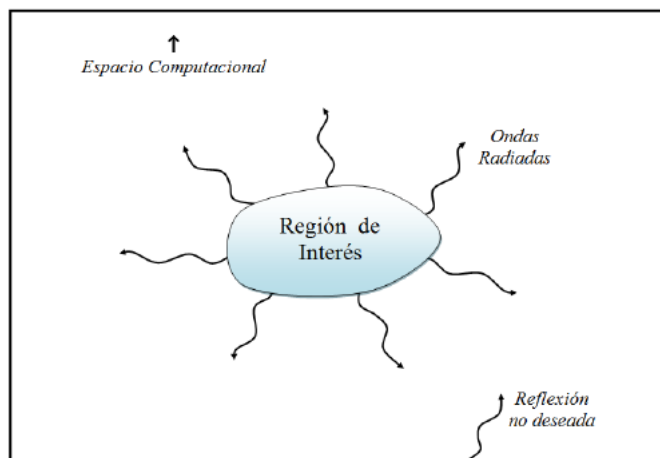


Figura A.2: Esquema de un problema de electrodinámica, en donde algunas ondas escapan al infinito.

APÉNDICE A. EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

A.3. CAPA DE ACOPLAMIENTO PERFECTO

Cuando se realiza una simulación con FDTD se presenta un problema cuando el campo llega a la orilla del espacio de cómputo: se refleja, como se aprecia en la Figura A.2. Esta reflexión no deseada interfiere con los resultados, por lo que es necesario implementar una herramienta que elimine dicha reflexión. La solución de este problema involucra directamente el tamaño del área simulada por FDTD, puesto que se encuentra acotada por los recursos computacionales empleados.

Una de las herramientas más utilizadas para solucionar este problema (Figura A.3) es el método llamado capas de acoplamiento perfecto (PML por sus siglas en inglés).

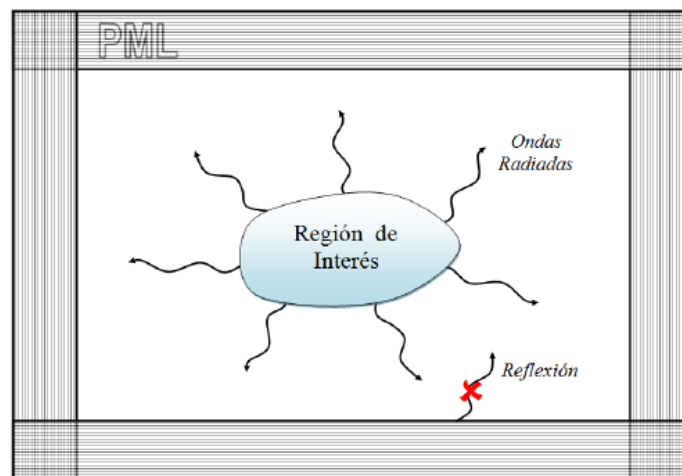


Figura A.3: Esquema de un problema de electrodinámica, con el espacio computacional delimitado por las PML.

El método PML y las variantes que han surgido, definen una capa ficticia que tenga igual impedancia que su capa contigua para toda frecuencia y para todo ángulo (FDTD de Lumerical cuenta con condiciones de contorno PML). La función de esta capa es absorber todo lo que llegue a ella, y la consecuencia es evitar que la reflexión de la misma. Lo anterior se logra al introducir condiciones de absorción y constantes ficticias que simulen una respuesta anisotrópica en ϵ y μ [21].