



# Diseño e Implementación de un módulo para simular Fibras de pocos Modos

**Diego Camilo Abadía Salamanca**

Máster en Ingeniería de Telecomunicaciones UOC-URL

Director: **Josep María Fábrega**

21/06/2017

### **C) Copyright**

© (el autor/a)

Reservados todos los derechos. Está prohibido la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la impresión, la reprografía, el microfilme, el tratamiento informático o cualquier otro sistema, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler y préstamo, sin la autorización escrita del autor o de los límites que autorice la Ley de Propiedad Intelectual.

## FICHA DEL TRABAJO FINAL

<b>Título del trabajo:</b>	Diseño e implementación de un módulo para simular Fibras de pocos Modos
<b>Nombre del autor:</b>	Diego Camilo Abadía Salamanca
<b>Nombre del consultor/es:</b>	Josep María Fábrega
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	06/2017
<b>Área del Trabajo Final:</b>	Comunicaciones Ópticas
<b>Titulación:</b>	<i>Master en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL</i>
<b>Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras):</b>	
<p>En este trabajo se estudia la Fibra óptica de pocos modos la cual surge desde hace un tiempo como una solución alterna para la gran demanda de información a transmitir en los sistemas de comunicación actualmente. Dicha Fibra puede estudiarse bajo algunas expresiones matemáticas que describen su comportamiento cuando se les ingresa una señal de entrada, estas expresiones son la NLSE y las ecuaciones de Manakov, las cuales tienen presente los efectos de dispersión, atenuación, GVD, Birrefringencia entre otros y para lo cual el método utilizado para dar solución a estas ecuaciones es el <i>Split Step Fourier</i>.</p> <p>Se utiliza una rutina realizada por la Universidad de Maryland llamada SSPROP la cual implementa el SSFM, y se desarrolla un código en MATLAB que utiliza la rutina con unas modificaciones hechas de acuerdo a las ecuaciones de Manakov; todo lo anterior para los modos L11a y L11b. Basado en lo anterior se hacen las simulaciones respectivas haciendo una que otra variación a parámetros de transmisión y viendo el comportamiento respectivo de las fibras tanto FMF como SMF.</p> <p>Al igual se utiliza un script para evaluar el comportamiento de la FMF, SSMF y B2B bajo el parámetro BER vs Sensibilidad; lo anterior generando conclusiones y dejando premisas para continuar con un trabajo posterior en la implementación de más modos de transmisión.</p>	

**Abstract (in English, 250 words or less):**

In this paper we study few mode optic fibers which has emerged for some time as an alternative solution for the great demand of information to be transmitted in the communication systems at the moment. This Fiber can be studied under some mathematical expressions that describe their behavior when they are entered an input signal, these expressions are the NLSE and the Manakov equations, which have the effects of dispersion, attenuation, GVD, Birefringence and others for Which the method used to give solution to these equations is the Split Step Fourier.

It uses a routine made by the University of Maryland called SSPROP which implements the SSFM, and I develop a code in MATLAB that uses the routine with some modifications made according to Manakov's equations; All of the above for modes L11a and L11b. Based on the above, the respective simulations are made by making a different variation to transmission parameters and seeing the respective behavior of the fibers both FMF and SMF.

A script is also used to evaluate the behavior of FMF, SSMF and B2B under the parameter BER vs Sensitivity; the previous generating conclusions and leaving premises to continue with a later work in the implementation of more modes of transmission.

**Palabras clave (entre 4 y 8):**

Birrefringencia, Split Step Fourier, Dispersión, Fibra de pocos modos, Ecuación de Manakov, SSPROP, NLSE

# Índice

1. Introducción .....	1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo .....	1
1.2 Objetivos del Trabajo.....	1
1.3 Planificación del Trabajo.....	3
2. Estado del Arte .....	5
2.1 Características de la Fibra Óptica .....	5
2.2 Modos de Propagación .....	6
2.3 Tipos de Fibra Óptica.....	9
2.4 Efectos no Lineales en la Fibra Óptica .....	10
2.5 Ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE) y ecuaciones de Manakov.....	12
2.6 SSPROP y SSFM .....	13
3. Ejecución del Proyecto.....	15
3.1 Función SSPROP .....	15
4. Simulación FMF y Resultados .....	17
5. Conclusiones .....	26
5.1 Conclusiones.....	26
5.2 Líneas Futuras.....	27
6. Bibliografía .....	28
7. Anexos.....	29
7.1 SSPROPV Modificado .....	29
7.2 Código Simulación FMF (2 Modos) .....	33
7.3 Simulación F.O. con Modulación OOK.....	35
6.3.1 Función Laser_cw.....	41
6.3.2 Función Modulator.....	41
6.3.3 Función APD.....	41
6.3.4 Función BER_OOK_real.....	42

## Lista de Figuras

Figura 1. Conceptos básicos Fibra Óptica .....	5
Figura 2. Modos de propagación LP .....	7
Figura 3. Diagrama b-v de modos LP .....	8
Figura 4. Soluciones exactas en función de V .....	8
Figura 5. Fibra Monomodo (SMF) .....	9
Figura 6. Fibra multi-núcleo .....	9
Figura 7. Fibra Multimodo .....	9
Figura 8. Split Step Fourier Method .....	13
Figura 9. Procedimiento SSFM .....	14
Figura 10. Comportamiento SMF y FFM en 5 Kms .....	18
Figura 11. Comportamiento SMF y FFM en 50 Kms .....	18
Figura 12. Comportamiento SFM y FFM en 100 Kms .....	19
Figura 13. Comportamiento SMF y FFM en 1000 Kms .....	19
Figura 14. Comportamiento SMF y FFM con Bit rate de $1e9$ .....	20
Figura 15. Comportamiento SMF y FFM con Bit rate de $10e9$ .....	21
Figura 16. Comportamiento SMF y FFM con Bit rate de $100e9$ .....	21
Figura 17. Comportamiento SMF y FFM con Bit rate de $1000e9$ .....	22
Figura 18. Comportamiento SMF y FFM con Atenuación de 0 dB/m .....	23
Figura 19. Comportamiento SMF y FFM con Atenuación de 0.4 dB/m .....	23
Figura 20. Comportamiento SMF y FFM con Atenuación de 0.8 dB/m .....	24
Figura 21. Comportamiento SMF y FFM con Atenuación de 1.2 dB/m .....	24
Figura 22. BER vs Sensibilidad FFM-SMF-B2B .....	25

# 1. Introducción

## 1.1 Contexto y justificación del Trabajo

En un mundo tan competitivo donde la información se ha vuelto el elemento más valioso para las empresas, instituciones, usuarios finales entre otros y las exigencias en las diferentes labores son mayores día a día, por lo anterior y para satisfacer dichas necesidades se hace necesario que los sistemas de comunicación sean capaces no solo de mover cantidades de información sino de hacerlo en el menor tiempo posible. La fibra óptica desde hace años emerge como un medio físico para la transmisión de información con ciertas características que hacen de ella muy llamativa en comparación con los medios tradicionales como el cable coaxial o par trenzado; sin embargo debido al aumento de usuarios, el volumen de información y la saturación de los canales se ha vuelto una limitante por la cual se comienza a explorar esquemas de multiplexación, investigación en fibras creando por ejemplo las fibras de múltiples núcleos (multi-core) o haciendo uso de diferentes modos de transmisión del haz de luz como son las fibras multimodo.

En este trabajo final de máster se propone implementar un módulo de simulación basado en modelos teóricos existentes de un tipo de fibra óptica (Few Mode Fiber, FMF) los cuales explican el comportamiento del paso del haz de luz y evaluarlo de acuerdo con los resultados que existen en la literatura y publicaciones de investigaciones hechas por diferentes autores; con esto se pretende hacer énfasis en un tipo de fibra nueva, la cual consiste en transmitir unos pocos haces de luz al mismo tiempo, la cantidad de modos que para el caso y que de aquí en adelante se trabajará estará comprendida en 2.

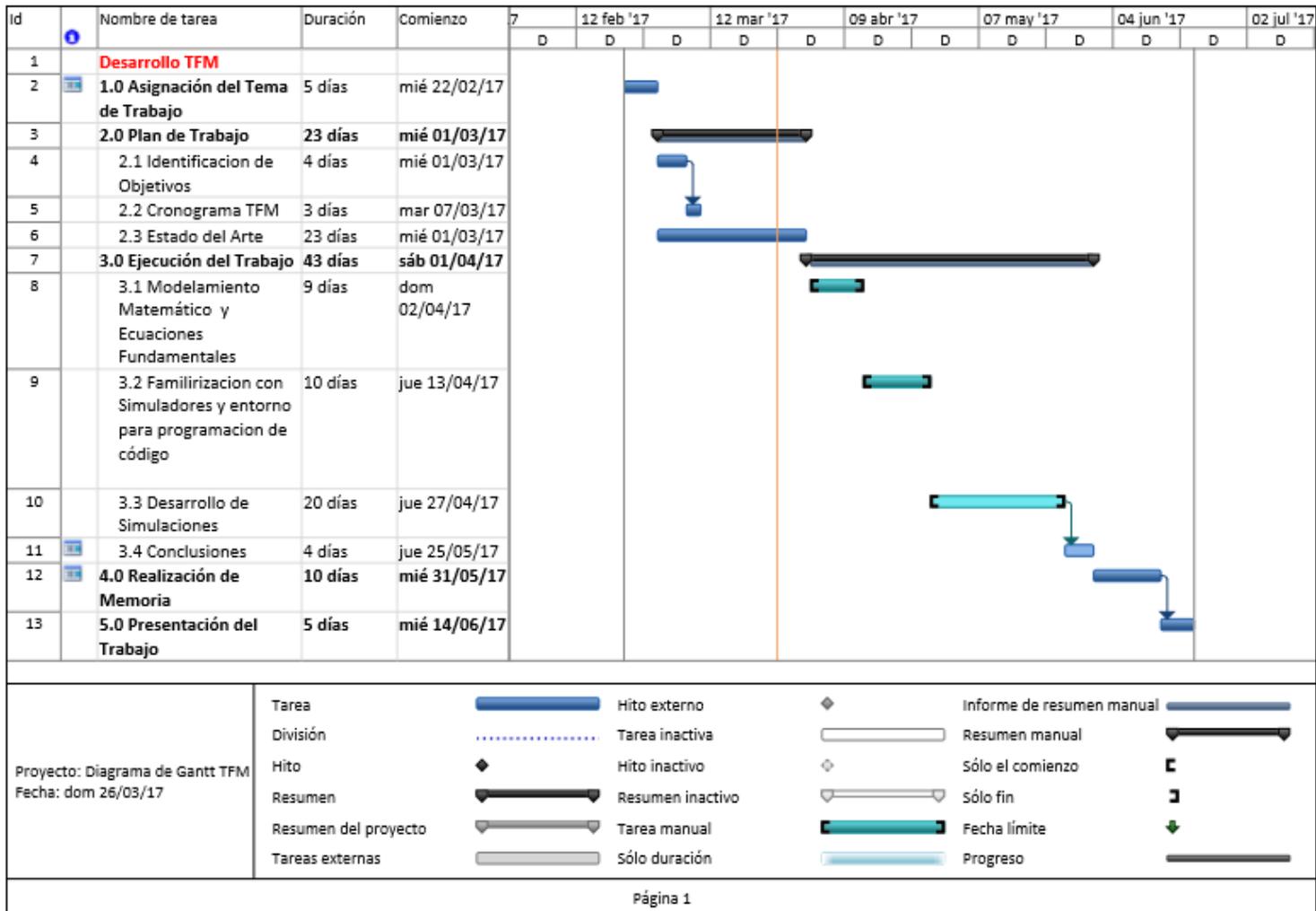
El desarrollo de este trabajo está estimado para un tiempo de 3 meses apoyándose en una herramienta desarrollada por la Universidad de Maryland y un desarrollo propio aprovechando las últimas investigaciones acerca del modelamiento de la fibra óptica a trabajar; inicialmente una recopilación de información de diferentes fuentes que proporcionen un estado del arte para tomarlo como punto de partida, posteriormente se fijarán unos objetivos claros y limitaciones para poder definir los tiempos de ejecución del proyecto. Ya teniendo esto establecido solo quedaría el desarrollo del mismo para lo cual se haga uso de diferentes herramientas e información pertinente y poder ejecutar el trabajo generando las respectivas conclusiones y dejando una memoria lo realizado.

Expresar igualmente el agradecimiento a la UOC y al profesor que lideró este proceso del TFM ya que es un trabajo bastante interesante y de punta en materia de investigación en el campo de la fibra óptica, el cual seguramente servirá para sacar conclusiones y posteriores desarrollos que aporten en la consecución de las necesidades de la población.

## 1.2 Objetivos del Trabajo

- ✚ Investigar acerca de las Fibras de Pocos Modos (FMF) y su modelado matemático empleando las investigaciones y estudios realizados a la fecha.
- ✚ Analizar el comportamiento de la fibra óptica en cuanto a no-linealidades.
- ✚ Modelar una fibra de pocos modos (2 modos) mediante herramientas como SSPROP y MATLAB.
- ✚ Simular el comportamiento bajo los modelos matemáticos adecuados y sus limitaciones mediante las diferentes herramientas tecnológicas.
- ✚ Comparar los resultados arrojados de acuerdo a las simulaciones hechas con los resultados teóricos.

### 1.3 Planificación del Trabajo



## DESCRIPCIÓN TAREAS:

### Asignación del Tema de Trabajo:

Consiste en la elección del tema de trabajo a desarrollar durante el Trabajo Final de Máster; esto junto con la asesoría del consultor correspondiente al área.

### Plan de Trabajo:

Identificación de Objetivos: Detallar los objetivos de la realización del trabajo que se va a encaminar y los esfuerzos y recursos del proyecto.

Cronograma TFM: Realizar la representación gráfica detallada para el conjunto de tareas con tiempos estimados garantizando la optimización de tiempos y recursos.

Estado del Arte: Recopilar información correspondiente al trabajo a desarrollar en beneficio del cumplimiento de objetivos y ejecución del proyecto que sirva de apoyo para la solución de los problemas e inquietudes que se puedan presentar en torno al trabajo final.

### Ejecución del Trabajo:

Modelamiento matemático y Ecuaciones fundamentales: En esta primera parte de la ejecución del trabajo, se pretende establecer y dejar claro el desarrollo matemático que ya existe detrás del objetivo a desarrollar; se hará énfasis en las NLSE y Ecs. Manakov las cuales son las más importantes en el desarrollo y con las cuales se trabajará para el modelamiento y posterior simulación.

Familiarización con Simuladores y entorno para programación de código: Manipular las herramientas tecnológicas para la simulación teniendo en cuenta que este es el objetivo del proyecto; al igual validar el entorno de programación para relacionar el modelamiento matemático y demás en la misma.

Desarrollo de Simulaciones: Realizar las simulaciones correspondientes bajo los parámetros y características detalladas en los puntos anteriores, comparando con los resultados teóricos y extraer las respectivas conclusiones.

### Realización de Memoria:

Dejar plasmado mediante una Memoria el trabajo desarrollado durante el TFM con las respectivas simulaciones y conclusiones. Es de gran importancia dejar documentado lo realizado en el proyecto.

### Presentación del trabajo:

Realizar la presentación del trabajo donde se pueda explicar cómo ha sido el desarrollo del mismo desde la documentación de su estado de arte y la ejecución de las simulaciones hasta las conclusiones que se extrajeron a partir los resultados.

## 2. Estado del Arte

Dentro del estado del arte de trabajo proyectado se ha estado revisando la tendencia de las tecnologías, desarrollo de nuevos materiales y conceptos en el campo de las comunicaciones ópticas, más específicamente en la fibra óptica la cual día a día se transforma como aquel medio físico que puede transportar cantidad de datos en el menor tiempo posible sin sacrificar sobre-costos en el momento de la implementación de sistemas con este tipo de tecnología, pero que de igual forma desde hace ya un buen tiempo se empieza a quedar corta debido a la gran exigencia de los usuarios finales.

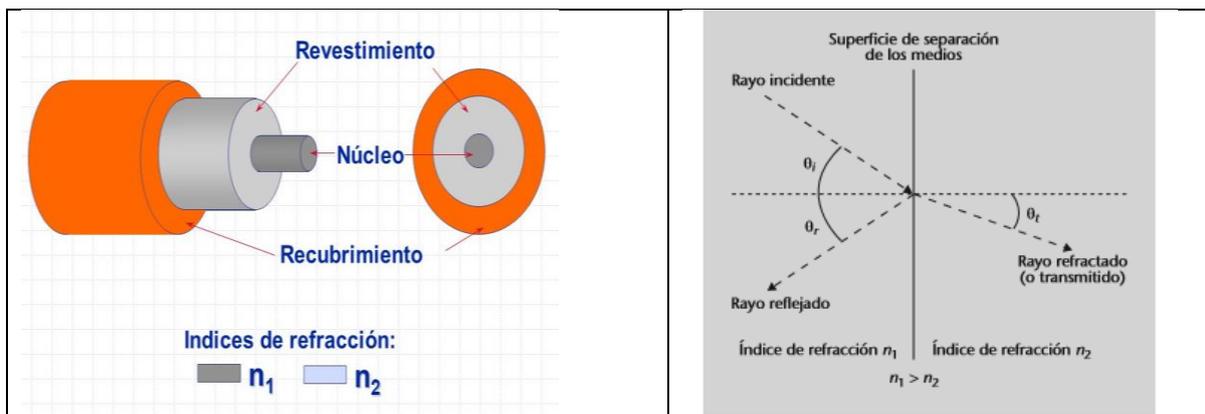
Lo anterior comienza a dar pie a soluciones emergentes como lo es la FMF (few mode fiber) la cual es el objetivo principal de este trabajo y sus correspondientes efectos para posteriormente ser simulados bajo una herramienta desarrollada por la Universidad de Maryland que implementa el método "Split Step Fourier" con el cual se obtiene una respuesta aproximada a los problemas de propagación de pulsos en medios dispersivos no-lineales solucionando tanto las ecuaciones no lineales de Schödinger como las de Manakov asociadas.

Para entender un poco más acerca de lo que se desea hacer, a continuación se presentarán algunos conceptos que van desde características básicas de la fibra óptica hasta llegar a las expresiones matemáticas que describen el comportamiento de un pulso en un medio guiado como éste

### 2.1 Características de la Fibra Óptica

La fibra óptica consiste en un cable de vidrio compuesto por un núcleo y un revestimiento los cuales tienen índices de refracción diferente. Para que la radiación del haz de luz pueda ser guiada de manera efectiva por la reflexión total en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento se hace necesario que el índice de refracción del núcleo  $n_1$  sea más alto que el índice del revestimiento  $n_2$  [1]. La fibra óptica funciona bajo las propiedades físicas de la reflexión y refracción dada mediante las leyes de Snell. Esto se puede ver de una manera más fácil en las siguientes figuras:

**Figura 1. Conceptos básicos Fibra Óptica**



## 2.2 Modos de Propagación

La luz como un campo electromagnético con una longitud de onda específica está regida mediante las ecuaciones de Maxwell. El campo magnético puede descomponerse en un conjunto de componentes llamados modos donde cada uno de estos se puede considerar como una distribución espacial del campo eléctrico dentro de la fibra. En el momento en que un pulso de luz polarizada se inyecta a una fibra óptica, se excitan múltiples modos. Sin embargo, hay que tener presente que no todos éstos pueden ser transmitidos a través de la fibra y que cada modo tendrá su respectiva velocidad de grupo a la cual viaja generando una degradación en la forma del pulso recibido. En un análisis basado en óptica de rayos, se puede considerar que el rayo que viaja a través del núcleo se inyecta con cierto ángulo, asociando cada modo con un ángulo incidente diferente en cada uno de ellos.

Estos modos, llamados transversales tienen un perfil de campo electromagnético en un plano perpendicular a la dirección de propagación del rayo, son debidos a las condiciones de frontera impuestas por el medio. Los modos transversales son clasificados de la siguiente manera:

- Modos TE (Transversal Eléctrico): No existe componente del campo eléctrico en la dirección de propagación.
- Modos TM (Transversal Magnético): No existe ninguna componente del campo magnético en la dirección de propagación.
- Modos TEM (Transversal Electromagnético): No existe ninguna componente del campo eléctrico y magnético en la dirección de propagación.
- Modos HE o EH: Cuando los valores de E o H son distintos de cero se denominan modos híbridos y su designación dependerá de si E o H respectivamente tienen una mayor contribución transversal que la otra.

Las condiciones para el cálculo del corte de un modo concreto pueden expresarse en función de la frecuencia normalizada, este parámetro conocido como  $V$ , definido por:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (1)$$

Donde  $NA$  es la apertura numérica y  $a$  el radio del núcleo. Dicha frecuencia se puede utilizar para medir el número de modos que una fibra puede soportar; para ello se utiliza la figura 3 el cual es un diagrama  $b$ - $V$  el cual es una representación normalizada. El parámetro  $b$  es llamado constante de propagación normalizada definida por:

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} NA \quad (2)$$

Donde  $k$  es la constante de propagación.

La propagación guiada como lo es en la fibra óptica, queda determinada por la naturaleza de su interface la cual genera unas condiciones de contorno por lo cual para dar solución se hace necesario del estudio del electromagnetismo para explicar lo que sucede como anteriormente se mencionó y de allí que es importante conocer la distribución espacial del campo EM. Ante la existencia de fibras ópticas con perfiles como con salto de índice, índice gradual u otras, se tiene que para F.O. con S.I. la solución es analítica mientras que

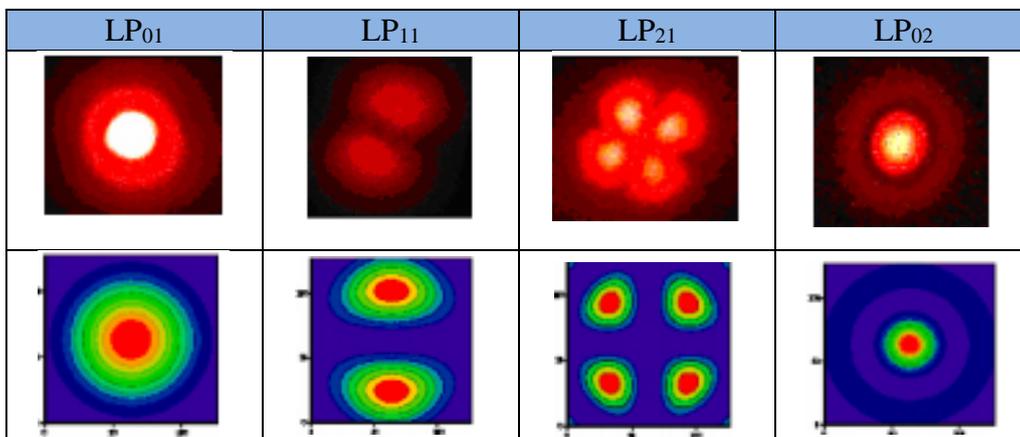
para F.O. con índice gradual o cuadradas se debe hacer uso de aproximaciones como lo son los métodos numéricos [2].

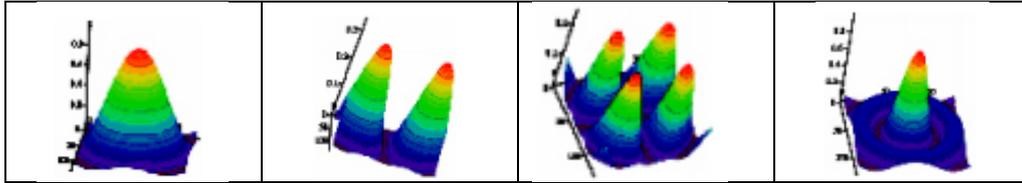
Empleando las condiciones de contorno de la fibra, se tiene que se propagan los modos transversales como lo son TE, TM, HE y EH descritos anteriormente. Por otro lado, se tiene que en la fibra óptica pueden propagarse modos híbridos, ya que se pueden considerar “casi” transversales teniendo en cuenta siempre que la diferencia entre los índices de refracción es muy poca. Lo anterior da pie para introducir a los modos LP (linealmente polarizados) los cuales son manejados en el campo de la fibra óptica y no son consideradas como soluciones directas a las ecuaciones de Maxwell, sino combinaciones lineales de varias soluciones. De manera resumida se tendría la siguiente tabla la cual corresponde a la relación entre los modos tradicionales y los LP [3]:

Modos LP	Modos exactos y número	N° de modos total en el modo LP
LP <sub>01</sub>	HE <sub>11</sub> x 2	2
LP <sub>11</sub>	TE <sub>01</sub> , TM <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub> x 2	4
LP <sub>21</sub>	EH <sub>11</sub> x 2, HE <sub>31</sub> x 2	4
LP <sub>02</sub>	HE <sub>12</sub> x 2	2
LP <sub>31</sub>	EH <sub>21</sub> x 2, HE <sub>41</sub> x 2	4
LP <sub>12</sub>	TE <sub>02</sub> , TM <sub>02</sub> , HE <sub>22</sub> x 2	4
LP <sub>41</sub>	EH <sub>31</sub> x 2, HE <sub>51</sub> x 2	4
LP <sub>22</sub>	HE <sub>13</sub> x 2	4
LP <sub>03</sub>	EH <sub>41</sub> x 2, HE <sub>61</sub> x 2	2
LP <sub>51</sub>	TE <sub>0m</sub> , TM <sub>0m</sub> , HE <sub>2m</sub> x 2	4
LP <sub>1m</sub>	EH <sub>l-1,m</sub> x 2, HE <sub>l+1,m</sub> x 2	4
LP <sub>lm</sub> (l≠0 ó 1)		4

Hay un modo que siempre se propaga como lo es LP<sub>01</sub> considerado el modo fundamental. En la figura 2 se puede observar la distribución espacial correspondiente a diferentes modos

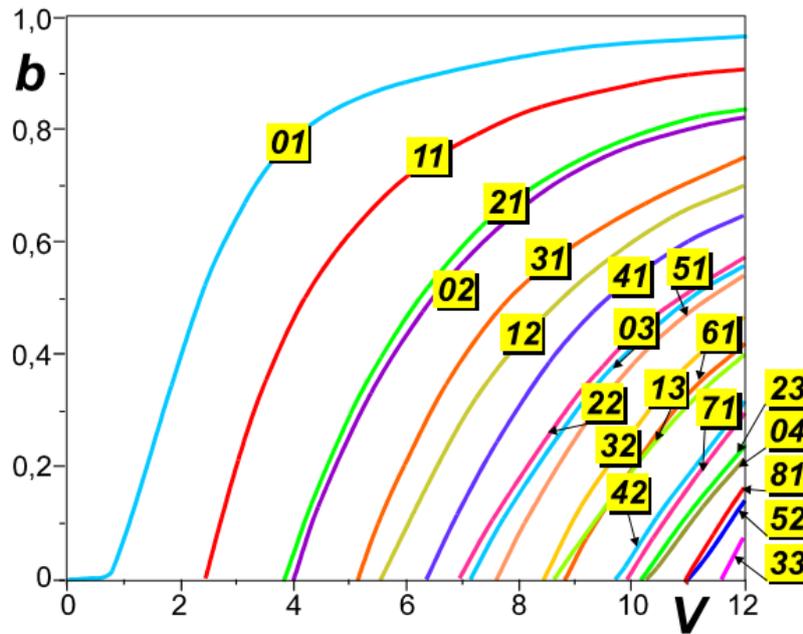
**Figura 2. Modos de propagación LP**





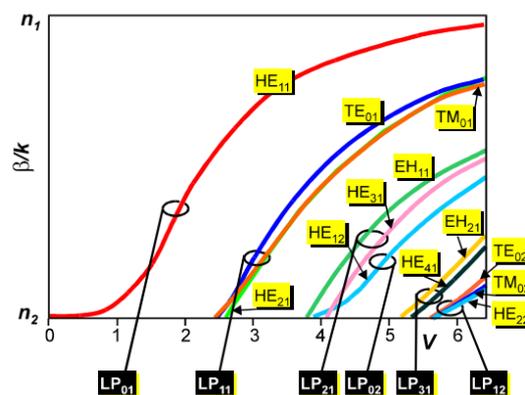
En la Figura 3 es posible evidenciar el diagrama de los modos LP para fibras ópticas; los puntos con  $\mathbf{b} = \mathbf{0}$  ( $b$ , es un parámetro llamado constante de propagación normalizada definida por los índices de refracción y otros) corresponden a frecuencias de corte de cada modo.

**Figura 3. Diagrama b-v de modos LP**



El modo fundamental  $LP_{01}$  no tiene frecuencia de cutoff, el siguiente modo corta en  $v = 2,405$  que representa hasta donde puede una fibra óptica ser monomodo [2] y que correspondería al modo  $LP_{11}$  (modos degenerados) y para el desarrollo de la simulación se tendrían los modos  $LP_{11a}$  y  $LP_{11b}$  los cuales son asociados debido a que tienen constantes de propagación muy similar, esto se puede apreciar en la figura 4.

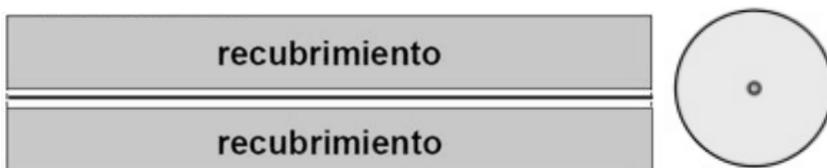
**Figura 4. Soluciones exactas en función de V**



## 2.3 Tipos de Fibra Óptica

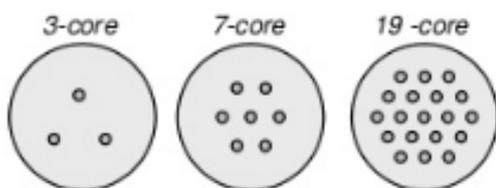
Fibra Monomodo (SMF): Consiste en una fibra que tiene tan solo un modo de propagación único por donde el haz de luz se proyecta, ofreciendo la capacidad de transportar mayores flujos de información pero con la limitante de que solo se pueden transmitir rayos que sigan la trayectoria que tiene la fibra.

**Figura 5. Fibra Monomodo (SMF)**



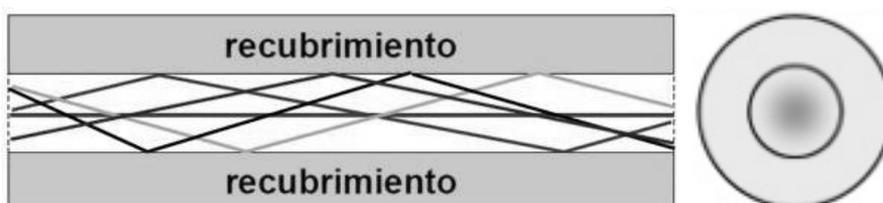
Fibra Multi-núcleo (MCF): Consiste en una fibra la cual tiene varios núcleos dentro del mismo revestimiento y cada uno de estos núcleos se considera como un canal diferente con lo cual la capacidad de transportar datos se incrementa.

**Figura 6. Fibra multi-núcleo**



Fibra Multimodo (MMF): Es una fibra que tiene la capacidad de transportar múltiples modos de haces de luz, lo cual indica que dentro de la fibra viajan varios rayos ópticos que se reflejan a diferentes ángulos y por lo tanto recorriendo diferentes distancias generando un desfase limitando la distancia de la transmisión

**Figura 7. Fibra Multimodo**



Fibra de Pocos Modos (FPM): Esta fibra presenta unas características de alguna manera mixtas entre las fibras descritas anteriormente; ya que es resistente en cuanto al acoplamiento de modos en comparación con las MMF pero al mismo tiempo los diámetros de los núcleos son grandes en relación a las SMF. Por lo anterior las FPM pueden experimentar menos linealidad debido al posible acoplo entre modos, pero con un rendimiento similar al de las fibras SMF.

## 2.4 Efectos no Lineales en la Fibra Óptica

El estudio de la mayoría de efectos no lineales en las fibras ópticas incluye el uso de pulsos cortos con anchos en el rango de 10 ns-10 fs; en el momento que se presenta dicho pulso en la fibra óptica se presenta la influencia de 2 efectos tales como la dispersión y la no-linealidad. El estudio matemático y las expresiones son deducidos a partir de la ecuación de onda que gobierna el pulso óptico y que es presentada a continuación tras un desarrollo matemático por los diferentes autores [4]:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 E}{dt^2} = \mu_0 \frac{d^2 P_L}{dt^2} + \mu_0 \frac{d^2 P_{NL}}{dt^2} \quad (3)$$

En la ecuación anterior se encuentra tanto la parte lineal como la no-lineal relacionadas por el campo eléctrico; donde:

$c$  = velocidad de la luz

$E$  = campo eléctrico

$\mu_0$  = permitividad en el vacío

$P_L$  = parte lineal

$P_{NL}$  = parte no lineal

A continuación se presenta la descripción de algunos efectos presentados:

### ➤ Group Velocity Dispersion (GVD):

La dispersión en la fibra óptica es un factor de alta importancia y crítica al mismo tiempo en el funcionamiento y desempeño de la misma cuando se propaga un pulso óptico corto; ya que al descomponer espectralmente dicho pulso entonces cada componente puede experimentar diferentes velocidades. Los efectos de la dispersión son contabilizados de manera matemática mediante la expansión de la constante de propagación llegando a la obtención de parámetros como  $\beta_1$  y  $\beta_2$  dónde [4]:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (4)$$

Dónde:

$$\beta_m = \left( \frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega = \omega_0} \quad (5)$$

Y mediante manipulación matemática se llega a:

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} \quad (6)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left( 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \quad (7)$$

Donde  $v_g$  es la velocidad de grupo y  $n_g$  el índice de grupo. De lo anteriores términos, el último  $\beta_2$  representa la dispersión de la velocidad de grupo o también conocida como dispersión y es responsable de la amplificación del pulso óptico

➤ Higher Order Dispersion:

Corresponde a las derivadas de mayor orden de la expresión anterior que utiliza la expansión mediante series de Taylor de la Dispersión, para el caso se tendrá en cuenta el termino  $\beta_3$  que concierne a la dispersión de la fibra de tercer orden [4].

➤ Loss:

Las pérdidas en los sistemas de comunicación que utilizan la fibra óptica como medio de transmisión presentan pérdidas atribuidas a diferentes características entre otras a los imperfectos que se puedan generar en el proceso de fabricación, materiales, imperfecciones, que conlleva a que la misma presente una atenuación por cierta longitud la cual está dada dentro de las características propias de cada fibra por el fabricante.

➤ Self-phase Modulation:

Es un efecto no lineal óptico en el cual un pulso de muy corta duración inducirá una variación del índice refractivo del mismo medio en el cual se transporta debido al efecto Kerr, esto se da de acuerdo a la dependencia de la intensidad del índice de refracción en estos medios lo cual conlleva a presentar un fenómeno de ensanchamiento espectral del pulso óptico y modificación de su misma fase [4].

➤ Self Steepening:

Efecto surgido a partir de la dependencia de la intensidad de la velocidad de grupo, generando una asimetría en el aumento de SPM de los pulsos ópticos ultra cortos [4], básicamente cambia la forma del pulso de luz debido a la propagación en un medio [5].

➤ Efecto de Birrefringencia en F.O.:

En fibras ópticas ideales normalmente se cumple que la constante de propagación  $\beta$ , es idéntica en todos los puntos del núcleo de la fibra, sin embargo, en una fibra real esto no se cumple, debido a imperfecciones en el núcleo generadas por la no circularidad del mismo y a las variaciones de los perfiles de los índices de refracción. Debido a estas variaciones, se produce el fenómeno de birrefringencia, propagándose dos modos LP01 diferentes, uno según el eje x y otro según el eje y [6].

$$Fibra\ ideal \rightarrow \beta_x = \beta_y \quad (8)$$

$$Fibra\ real \rightarrow \beta_x \neq \beta_y \quad (9)$$

Al tener distinta constante de propagación los modos se propagan a diferente velocidad, lo que da lugar a una dispersión; definida cuantitativamente como la diferencia entre constantes de propagación normalizada de ambos modos [7]:

$$\beta f = ny - nx \rightarrow \beta = \beta_0(ny - nx) \quad (10)$$

## 2.5 Ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE) y ecuaciones de Manakov

### Ecuación no Lineal de Schrödinger:

Es una variación no lineal proveniente de la ecuación de Schrödinger que es aplicada para ondas planares, condensados de Bose-Einstein y considerada una de las ecuaciones más importantes y fundamentales en el ámbito de las comunicaciones ópticas, la cual describe la propagación de las señales ópticas en medios y estructuras dispersas no lineales como la fibra multimodo [8].

$$\frac{dA(t,z)}{dz} = -\frac{j\beta_2}{2} \frac{d^2A(t,z)}{dt^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{d^3A(t,z)}{dt^3} - \frac{\alpha}{2} A(t,z) + j\gamma \left[ |A(t,z)|^2 A(t,z) + \frac{j}{w_0} \frac{d(|A|^2 A)}{dt} - T_R \frac{d(|A|^2)}{dt} A \right] \quad (11)$$

Dónde:

$\alpha$ : pérdidas en la fibra óptica dada en 1/m

$\gamma$ : No linealidad en la fibra dada en 1/W.m

$\beta_2$ : dispersión de segundo orden de la fibra dada en  $s^2/m$

$\beta_3$ : dispersión de tercer orden de la fibra dada en  $s^3/m$

$T_R$ : aproximación para incorporar la respuesta "Raman"

$w_0^{-1}$ : aproximación para incorporar el efecto "Self – Steepening"

### Ecuaciones de Manakov:

Se trata de un sistema de ecuaciones acopladas (N NLSEs) generadas a partir de tener en cuenta el efecto de Birrefringencia y la propagación de diferentes modos, se considera como un punto de partida del estudio teórico de la transmisión no lineal

$$\frac{d\bar{A}_p}{dz} + \langle \delta\beta_{0p} \rangle \bar{A}_p + \langle \delta\beta_{1p} \rangle \frac{d\bar{A}_p}{dt} + i \frac{\beta_{2p}}{2} \frac{d^2\bar{A}_p}{dt^2} = i\gamma \left( f_{pppp} \frac{8}{9} |\bar{A}_p|^2 + \sum_{m \neq p} f_{mmp} \frac{4}{3} |\bar{A}_m|^2 \right) \bar{A}_p \quad (12)$$

Dónde:

$$\langle \delta\beta_{0p} \rangle = \frac{1}{2} (\beta_{px} + \beta_{py}) - \beta_r \quad (13)$$

$$\langle \delta\beta_{1p} \rangle = \frac{1}{2} \left( \left. \frac{d\beta_{px}}{dw} \right|_{w_0} + \left. \frac{d\beta_{py}}{dw} \right|_{w_0} \right) - \frac{1}{v_{gr}} \quad (14)$$

La expresión anterior corresponde a la ecuación de Manakov estándar para fibras multimodo que toma en cuenta la polarización birrefringencia dentro de cada modo espacial [9]

## 2.6 SSPROP y SSFM

### SSPROP:

Es una rutina de software de propósito general que implementa el método Split-Step Fourier para dar solución a la ecuación no-lineal de Schrödinger, fue desarrollada por un grupo de profesionales de la Universidad de Maryland [10].

### METODO SPLIT STEP FOURIER:

Se considera el método Split Step Fourier como un análisis numérico pseudo-espectral usado para solucionar la ecuación no lineal y más precisamente en este caso la NLSE (Nonlinear Schrödinger Equation). Básicamente consiste en 2 bloques importantes, el primero de ellos es el cálculo de la solución en “small steps” tratando tanto la parte lineal como la no-lineal en pasos separados; en segundo lugar es necesario tanto la transformada de Fourier como su transformada inversa puesto que el paso lineal se hace en el dominio de la frecuencia mientras que el paso no-lineal se hace en el dominio del tiempo como se puede observar en la siguiente figura [11] [12]:

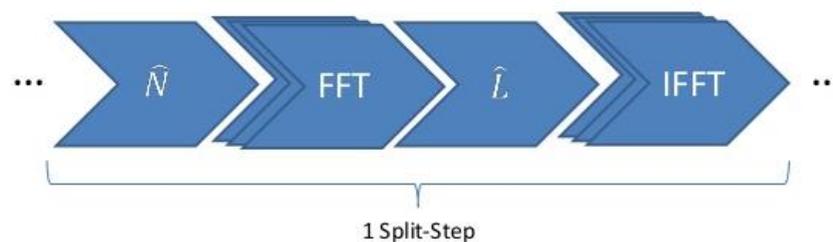
**Figura 8. Split Step Fourier Method**

## Split-Step Fourier Method (SSFM)

- Splits nonlinear Schrödinger equation in linear and nonlinear parts
- Separate solution of linear and nonlinear parts

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \underbrace{\left( \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \right)}_{=: \hat{L}} A = \underbrace{\left( -\frac{\alpha}{2} + i\gamma|A|^2 \right)}_{=: \hat{N}} A$$

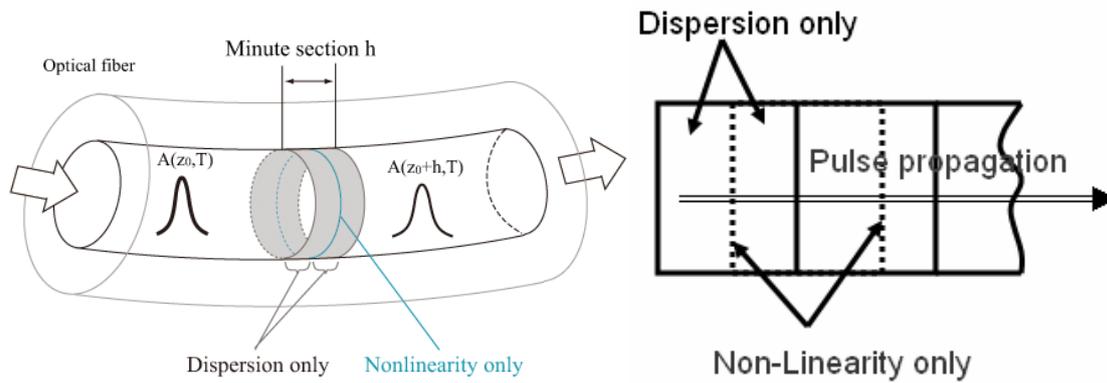
- Solution of the linear part in the frequency domain and of the nonlinear part in time domain (acceptable for small step-sizes)



En condiciones normales tanto la dispersión como la no-linealidad interactúan mutuamente mientras el pulso óptico se propaga a través de la fibra; luego dicho método asume que trabajando sobre pequeñas longitudes de fibra, los efectos de dispersión y no-linealidad en el campo óptico de propagación son independientes.

De acuerdo a la anterior figura, el pulso óptico es propagado segmento a segmento en 2 etapas, la primera de ellas consiste en que el pulso se propaga a través del operador lineal hasta  $\delta z/2$  tomando solo en cuenta los efectos de la dispersión y la segunda parte es calcular la no linealidad en la mitad del segmento. La segunda parte del segmento ( $\delta z/2 - \delta z$ ) se le aplica nuevamente el operador lineal como se aprecia en la figura. El proceso debe continuar repetitivamente hasta finalizar la longitud total de la fibra.

**Figura 9. Procedimiento SSFM**



Generación de Pulsos Gaussianos:

El pulso que interactuará con la expresión matemática que modela la fibra está regido por la siguiente ecuación matemática [8]:

$$Pulso\ Gaussiano = \sqrt{P} e^{\left(\frac{-t^2(1+j*Chirp)}{2*T_0^2}\right)} \tag{15}$$

Dónde:

P = Potencia dada en Watts

T<sub>0</sub> = Ancho del pulso dado en segundos

t = Tiempo de Bit

Chirp = Factor de Chirp determina el grado de variación de la frecuencia de pulso y es adimensional

El objetivo de dicho pulso es validar el modelo que se realizó mediante la simulación con el ingreso de pulsos ópticos en los diferentes modos los cuales son normalmente utilizados para verificar el comportamiento de la F.O. teniendo en cuenta que sus respuestas son esperadas al finalizar la fibra por cada uno de sus modos y que en el momento de la simulación se evaluará por separado tanto la parte lineal como la no-lineal observando el comportamiento de acuerdo a las variaciones que se hagan en los parámetros.

## 3. Ejecución del Proyecto.

Como se mencionó anteriormente una de las ecuaciones más fundamentales en comunicaciones ópticas es la ecuación no lineal de Schrödinger, que rige la propagación de señales ópticas en fibras dispersivas no lineales. Desafortunadamente, en todos los casos excepcionales, la ecuación no lineal de Schrödinger no tiene soluciones analíticas y debe resolverse numéricamente [10].

SSPROP es una rutina de software de propósito general que utiliza el método Split Step Fourier que se puede invocar directamente de Matlab para resolver la ecuación de Schrödinger no lineal. Esta rutina consta básicamente de 2 funciones que son descritas a continuación.

### 3.1 Función SSPROP

Dicha función viene dentro de la rutina SSPROP ya descrita, utilizada para solucionar un sistema de una sola NLSE. En dicho script suministrado por la Universidad de Maryland se puede apreciar el método SSF claramente; en este se debe especificar los siguientes parámetros:

alpha: Corresponde al coeficiente de pérdidas de potencia de la señal de entrada  
betap: vector que asocia los efectos de dispersión, birrefringencia y otros.  
gamma: coeficiente de No linealidad.

### 3.2 Función SSPROPV

Dicha función viene dentro de la rutina SSPROP descrita en el capítulo anterior, esta se encarga de dar solución a las ecuaciones de Manakov donde se tiene en cuenta en efecto de Birrefringencia ya mencionado. Para la misma se necesita especificar parámetros tales como:

- alphaa/alphab: Asocia las pérdidas que corresponden respectivamente a los estados de polarización (cada modo)
- betapa/betapb: son vectores que asocian los efectos de dispersión, birrefringencia, slope de cada uno de los estados de polarización.
- psp: Estado de polarización con el cual la señal entra a la F.O.
- method: este parámetro es de gran importancia puesto que de ahí parte el análisis para desarrollar las expresiones adecuadas en la simulación, es el tipo de birrefringencia que se considera en la F.O. y de acuerdo a ello se trabaja con coordenadas en las cuales se trabajará.
- gamma: Coeficiente de No linealidad

Existen otros parámetros a tener en cuenta que exige la función, sin embargo son algo más sencillos de comprenderlos tales como las señales de entrada, el tamaño del paso o “stepsize” entre otros.

Cuando se habla de Birrefringencia en general, los ejes birrefringentes de una fibra óptica pueden no estar orientados en las direcciones “x” y “y”, sino en alguna otra dirección arbitraria  $\psi$ . Además, los dos estados propios ortogonales de la fibra pueden ni siquiera estar polarizados linealmente sino que podrían ser polarizados circular o elípticamente. La rutina SSPROP permite especificar por separado no sólo la dispersión  $\beta(\omega)$  y la pérdida ( $\alpha$ ) para cada uno de los dos estados propios, sino también los estados de polarización exacta a los que se aplican estos coeficientes. Para el caso concreto se trabajará con el método “circular” que tiene la característica de ser más exacto en comparación al método “elíptico” puesto que no descuida ningún término no lineal más sin embargo si sacrifica recursos para computar puesto que el tamaño del paso debe ser siempre mucho menor que la longitud para producir resultados significativos y adicional la elección del método influye en las coordenadas que se usan para mapear la señal de entrada con los estados de polarización

Para la simulación de la fibra y evaluar su comportamiento en 2 modos de transmisión, se tomó el trabajo hecho por la Universidad de Maryland con la rutina SSPROPV y adicional de acuerdo al desarrollo realizado por Mumtaz S. en [9] donde calculan la ecuación de Manakov para el modo  $p$ th como se describió en (10); para poder modificar la rutina del SSPROPV se hizo énfasis en la parte no lineal de adaptar dicha expresión, para ello se tuvo en cuenta la expresión matemática del par de ecuación acopladas necesarias para descomponer el campo en una componente derecha y otra izquierda de la polarización circular antes de que se calcule la propagación no lineal; de acuerdo a lo visto en [4] como se aprecia a continuación:

$$\frac{dA_+}{dz} + \beta_1 \frac{dA_+}{dt} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{d^2 A_+}{dt^2} + \frac{\alpha}{2} A_+ = \frac{i}{2} (\Delta\beta) A_- + \frac{2i\gamma}{3} (|A_+|^2 + 2|A_-|^2) A_+ \quad (15)$$

$$\frac{dA_-}{dz} + \beta_1 \frac{dA_-}{dt} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{d^2 A_-}{dt^2} + \frac{\alpha}{2} A_- = \frac{i}{2} (\Delta\beta) A_+ + \frac{2i\gamma}{3} (|A_-|^2 + 2|A_+|^2) A_- \quad (16)$$

De acuerdo a lo anterior se hizo la respectiva modificación en las líneas que calcula la sección no lineal de la cual hace parte el método Split Step Fourier, para entrar en detalles de dichas modificaciones en el capítulo de Anexos de este documento (6.1 SSPROPV Modificado) se encuentra el código completo de la rutina sspropv.m con las respectivas anotaciones.

## 4. Simulación FMF y Resultados

Para el diseño de las simulaciones para 2 modos se utilizaron datos de fibra óptica comercial [13] [14] [15] y otros traídos propiamente del trabajo realizado por Mumtaz S. en [9], de esta manera se diseñó la simulación utilizando como herramienta principal MATLAB [16] y con la ayuda como ya se describió anteriormente de la rutina SSPROP la cual contiene scripts para dar solución ya sea para un sistema de 1 NLSE o 2 NLSE acopladas.

En el anexo 6.2 (Código Simulación FMF) de este documento se puede apreciar detalladamente el código realizado para la simulación, el cual consta básicamente de:

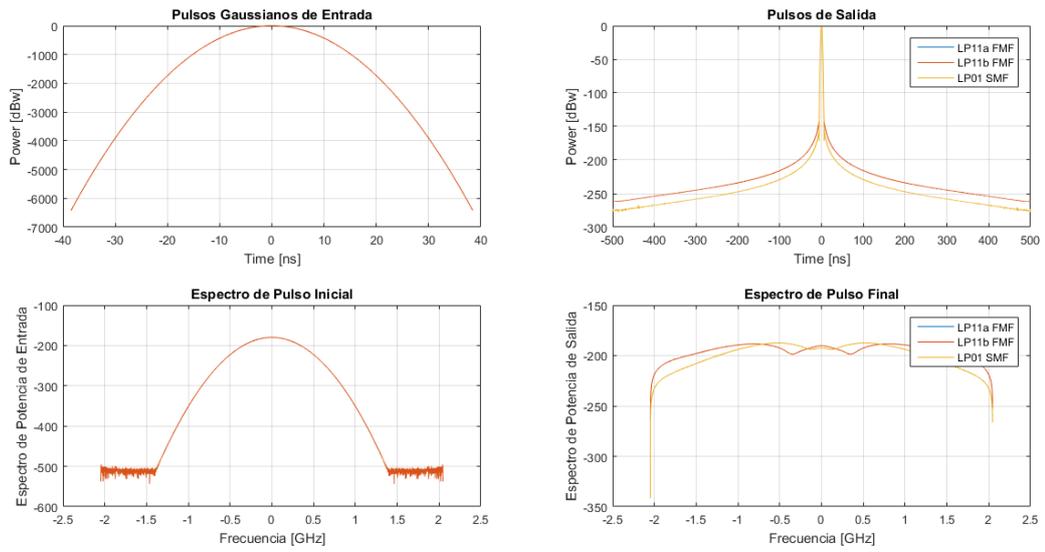
- Definición de parámetros del sistema
- Definición de señales de entrada
- Definición de los parámetros físicos de la F.O.
- Definición de los coeficientes de dispersión de la F.O.
- Propagación de señales en la F.O .
- Calculo de la propagación SMF (uso de script ssprop)
- Calculo de la propagación FMF (uso de script sspropv)
- Gráfica de señales y espectros

De acuerdo a lo anterior, el trabajo que se hizo básicamente fue realizar la simulación de los modos LP11a y LP11b los cuales corresponden a dos señales que para el caso son idénticas, las cuales son consideradas como señales de entrada y se propagarían a través de una fibra con unas características especiales (longitud de onda, distancia de la fibra, perdidas, dispersión, atenuación); como ya se tiene la rutina de SSPROP con la cual se pueda dar solución a la NLSE y Ecuaciones de Manakov las cuales describen el comportamiento de la fibra, entonces dichas señales que para el caso son pulsos se verán reflejadas con algunos cambios posteriormente donde se podrán evaluar los cambios que ha tenido y la influencia de la FMF, la idea después de esto es variar algunos parámetros para observar y analizar el comportamiento tanto de la fibra monomodo como la fibra de pocos modos.

Se esperaría que los resultados sean acordes a la teoría que indica que una fibra de pocos modos sacrificaría algo de velocidad de transmisión sin se evaluada en bloque (sin evaluar todos los modos) y al igual sacrificar distancia en comparación con una fibra de un único rayo de luz la cual puede servir para distancias mayores sin necesidad de utilizar otros elementos. En primer lugar se simulara una fibra con características establecidas donde se estará variando la distancia total de la misma. Posteriormente otros parámetros que arrojarán conclusiones acerca de su rendimiento

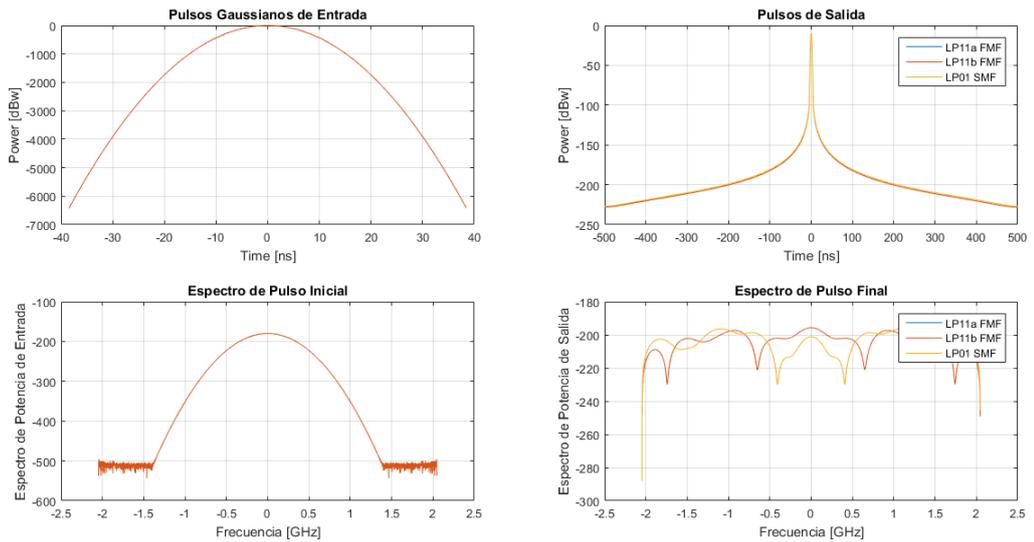
✚ Distancia de F.O. 5 Kms

**Figura 10. Comportamiento SMF y FMF en 5 Kms**



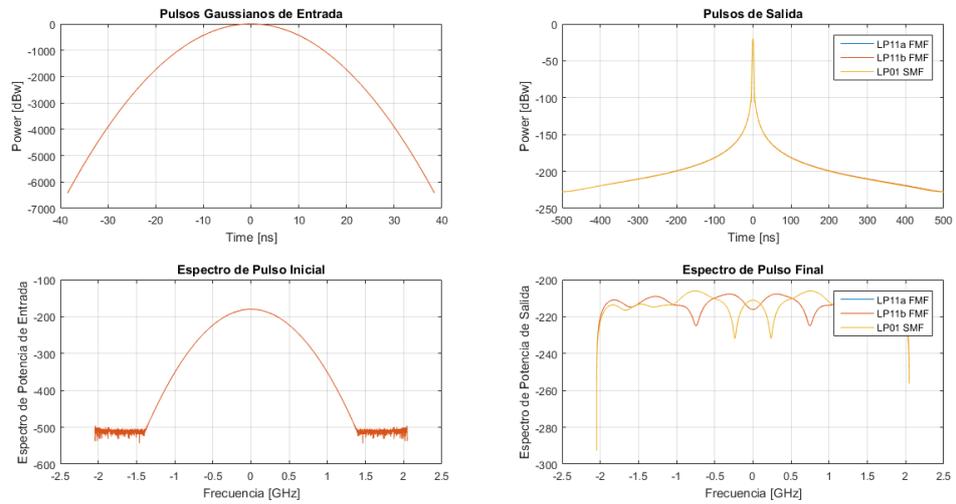
✚ Distancia de F.O. 50 Kms

**Figura 11. Comportamiento SMF y FMF en 50 Kms**



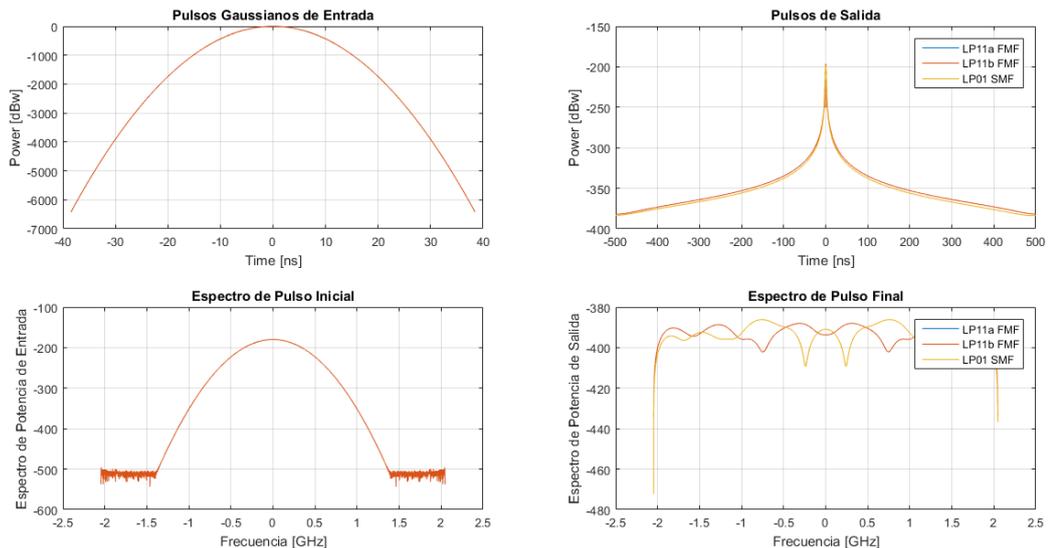
✚ Distancia de F.O. 100 Kms

**Figura 12. Comportamiento SFM y FMF en 100 Kms**



✚ Distancia de F.O. 1000 Kms

**Figura 13. Comportamiento SMF y FMF en 1000 Kms**



De acuerdo a las anteriores gráficas donde se hizo una variación en el parámetro distancia total de la F.O. para lo cual previamente se puede pensar en que el tiempo de procesamiento en la simulación va a aumentar en la medida que aumente la distancia ya que el método Split Step Fourier hace el cálculo basado en la cantidad de pasos con lo cual aumentaría de la misma manera. Al entrar en detalle de cada gráfica tanto de para el dominio temporal como el dominio de la frecuencia se puede extraer diferentes conclusiones acerca de la misma:

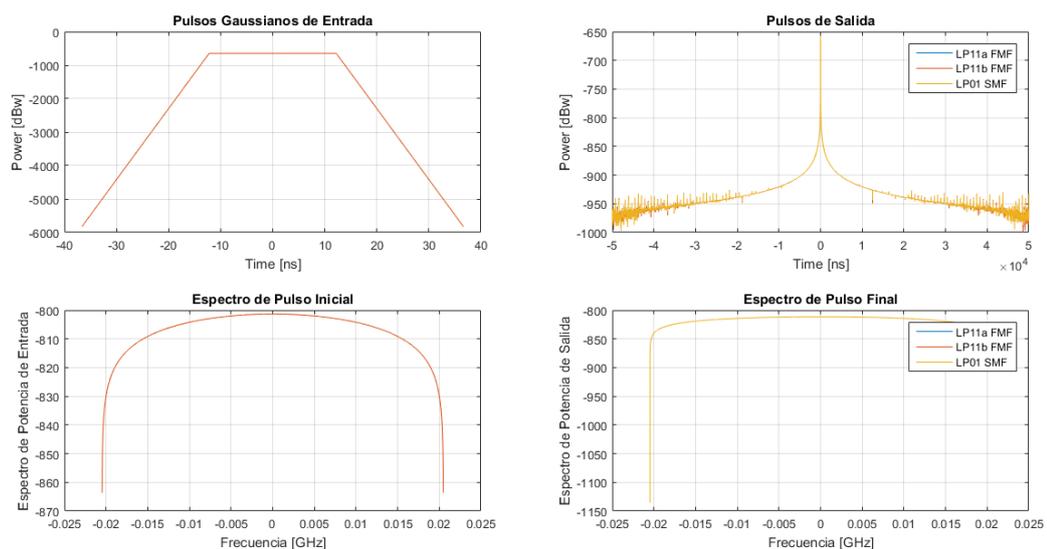
- En una distancia de 5 Km de F.O. la señal de salida de SMF es un poco atenuada en comparación a la FMF, dicha disminución de potencia aumenta en la forma del pulso entre más lejos está de su pico. En cuanto al espectro del pulso, la salida en ambas fibras es muy similar, con pequeñas ondulaciones que corresponde a atenuaciones muy leves para algunas frecuencias, sin embargo no hay cambios significativos entre ambas.
- A una distancia de 50 Km de F.O. las señales propagadas de salida en el dominio del tiempo tanto de la SMF como FMF son prácticamente idénticas, tienen el mismo comportamiento y no hay disminución de potencia en ninguna de las dos fibras; mientras que al evaluar el espectro de potencia de salida a pesar que ambas presentan ondulación, en la SMF se observa una disminución mayor para unas frecuencias específicas en comparación a la FMF.
- En 100 y 1000 Kms (distancias bastante grandes) lo que se observa es que hay una penalización mayor para SMF en relación a FMF en el dominio de la frecuencia, puesto que para algunas la disminución es mayor en la fibra de un solo modo y por el otro lado en cuanto al dominio temporal, las señales de salida para ambos tipos de fibra son muy similares con cambios mínimos.

Variación del parámetro bit rate:

Mediante la variación de este parámetro en la simulación, se conseguirá variar el ancho del pulso de entrada como se aprecia a continuación:

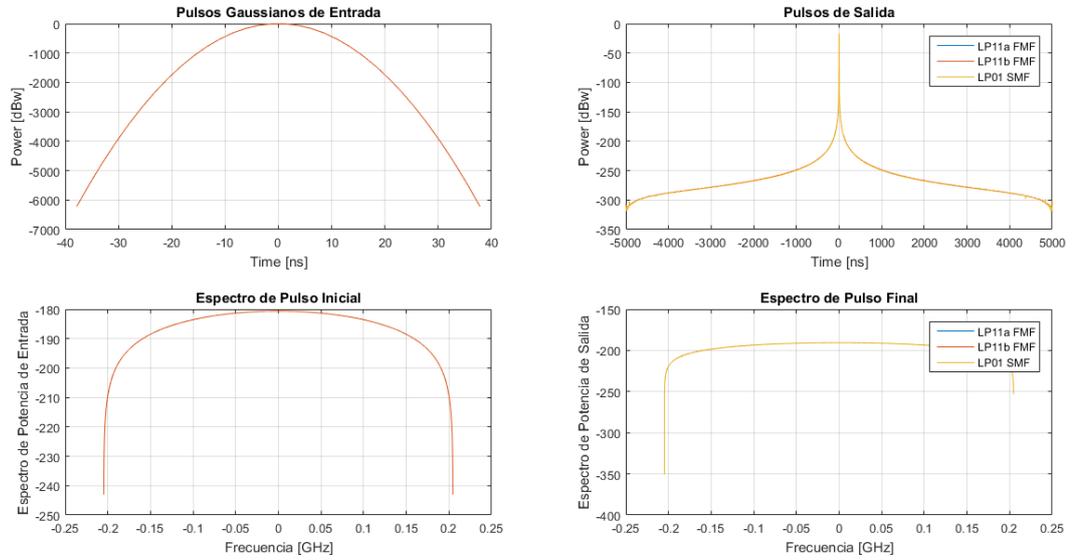
✚ Bit rate de 1e9

**Figura 14. Comportamiento SMF y FMF con Bit rate de 1e9**



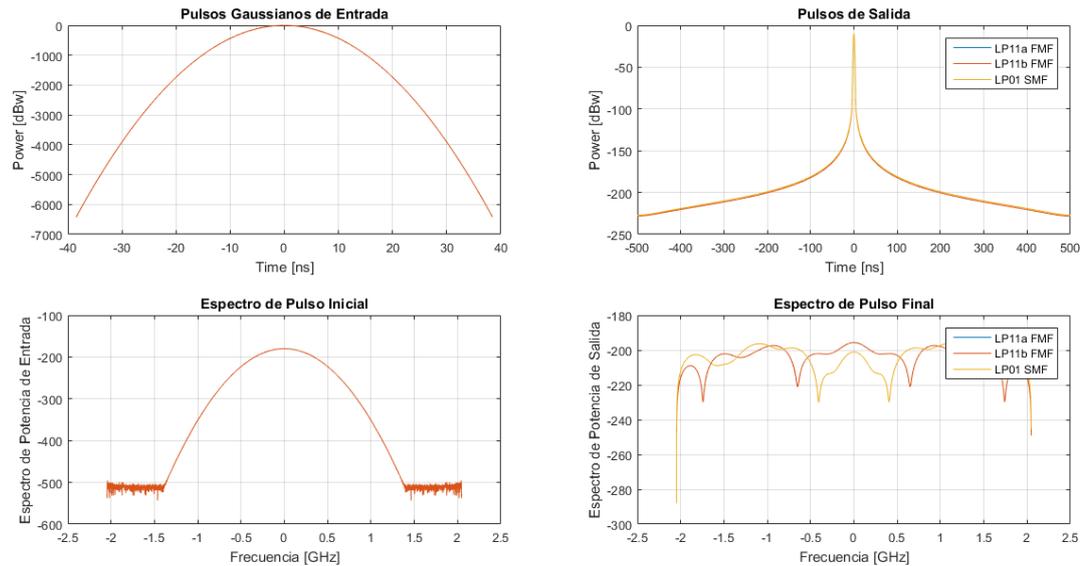
✚ Bit rate de 10e9

**Figura 15. Comportamiento SMF y FMF con Bit rate de 10e9**



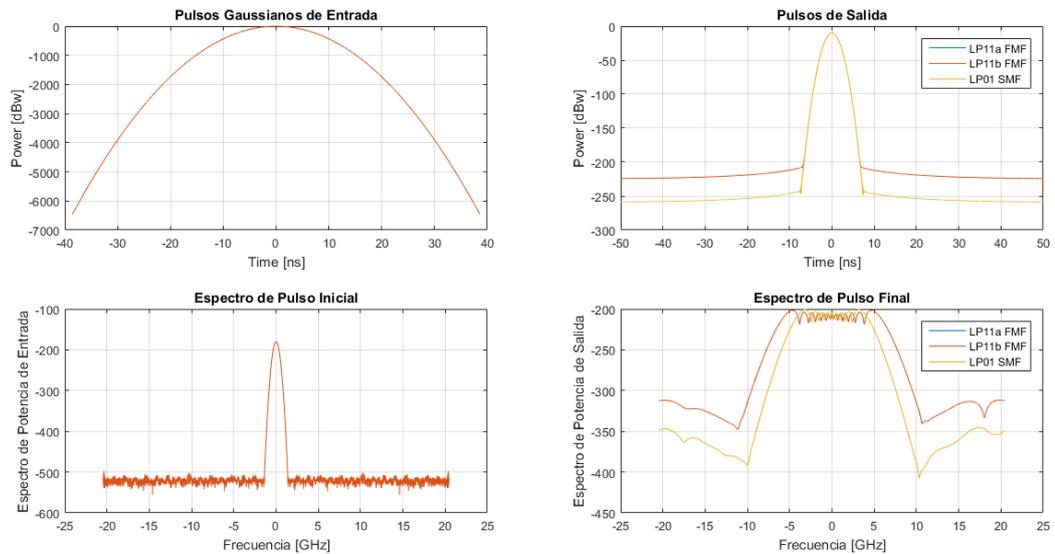
✚ Bit rate de 100e9

**Figura 16. Comportamiento SMF y FMF con Bit rate de 100e9**



✚ Bit rate de 1000e9

**Figura 17. Comportamiento SMF y FMF con Bit rate de 1000e9**



En las gráficas anteriores se hizo la variación de otro parámetro en la simulación como lo fue la anchura del pulsos, dejando solo un valor para la distancia de la F.O. (50 Km), de esta manera se logran extraer las siguientes anotaciones acerca del rendimiento de ambas fibras:

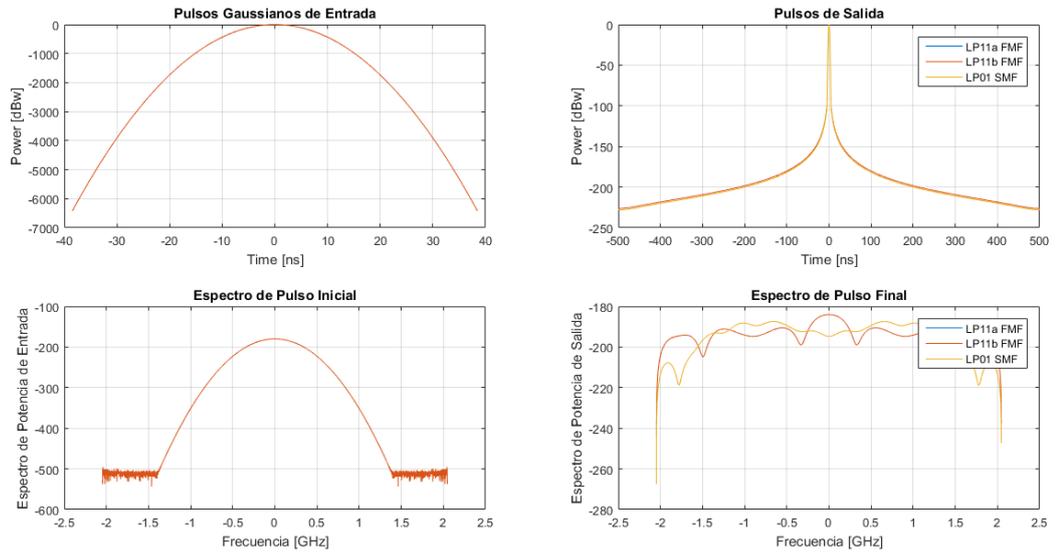
- Con una tasa menor como lo es  $1e9$ , la señal de entrada para ambos tipos de fibra estaría inicialmente falta de información y por lo tanto la forma del pulso no sería la adecuado de acuerdo a la simulación y su diseño plasmado, luego la señal de salida en el dominio del tiempo presentaría una pequeña distorsión tanto para SMF como FMF. En el dominio de la frecuencia no hay cambios para ninguna de las fibras y durante todo su espectro no se presenta atenuaciones o aumentos para alguna frecuencia específica.
- Al ir aumentando el parámetro, como por ejemplo a  $10e9$  el espectro no varía para ninguna de las fibras, pero la señal en el dominio del tiempo además de dejar de presentar pequeñas distorsiones también presenta una muy pequeña atenuación las señales de los modos correspondientes a la FMF con respecto a la fibra monomodo.
- En la medida en que se aumenta el bit rate, la señal en el dominio del tiempo comienza a presentar alteraciones mínimas en la forma del pulso, la información transmitida seguramente se altera y esto se da para ambas fibras, sin embargo las señales no se ven tan atenuadas; y en cuanto al espectro de frecuencia se presentan muchas atenuaciones a diferentes frecuencias tanto para SMF como FMF. Al igual al llegar a un bit rate bastante alto como  $1000e9$  la señal de espectro de entrada es muy reducida en un rango de frecuencias bastante pequeño.

Variación del parámetro Atenuación:

Se hizo simulaciones también variando el parámetro de atenuación y se observó lo siguiente:

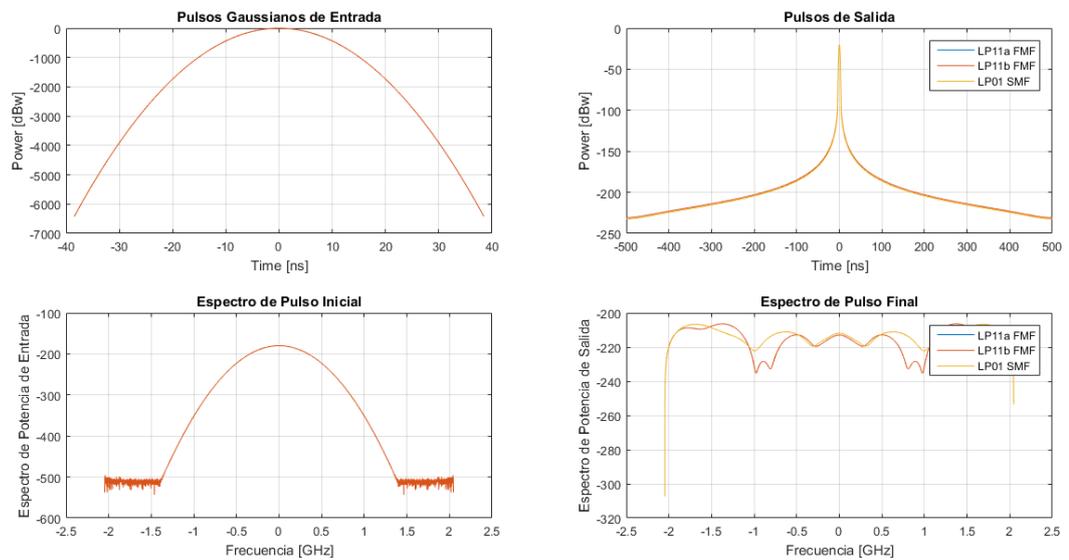
✚ Atenuación de 0 dB/m

**Figura 18. Comportamiento SMF y FMF con Atenuación de 0 dB/m**



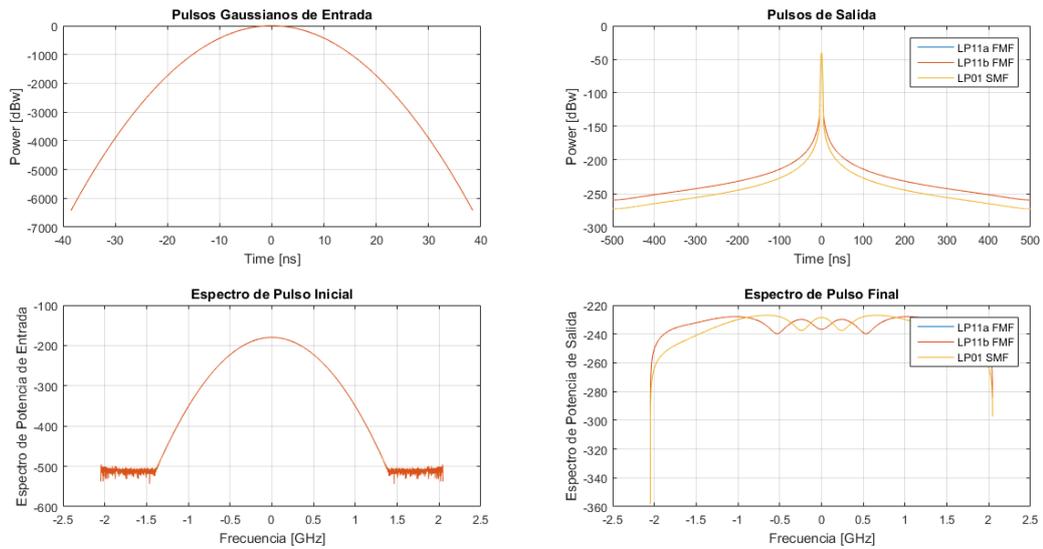
✚ Atenuación de 0.4 dB/m

**Figura 19. Comportamiento SMF y FMF con Atenuación de 0.4 dB/m**



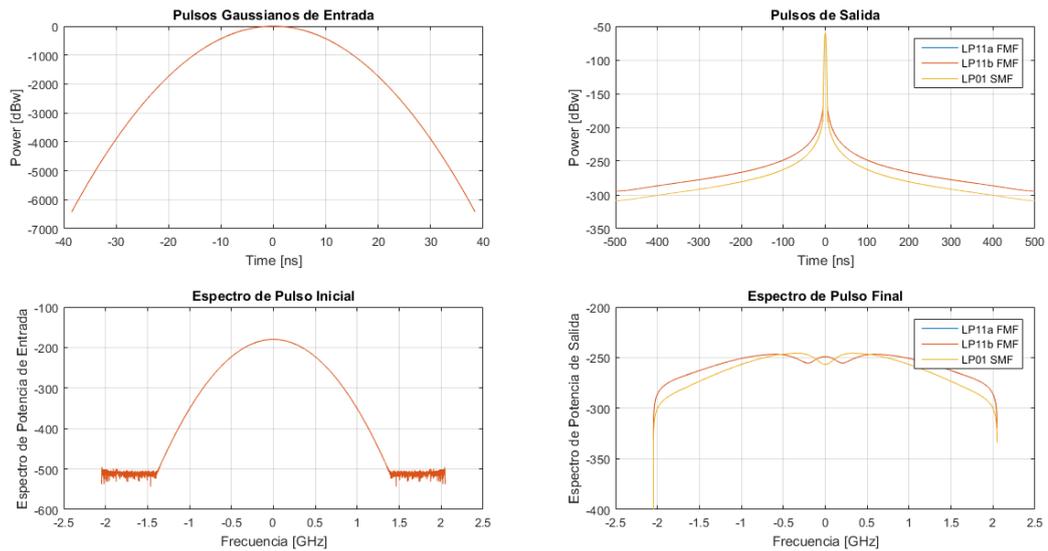
✚ Atenuación de 0.8 dB/m

**Figura 20. Comportamiento SMF y FMF con Atenuación de 0.8 dB/m**



✚ Atenuación de 1.2 dB/m

**Figura 21. Comportamiento SMF y FMF con Atenuación de 1.2 dB/m**

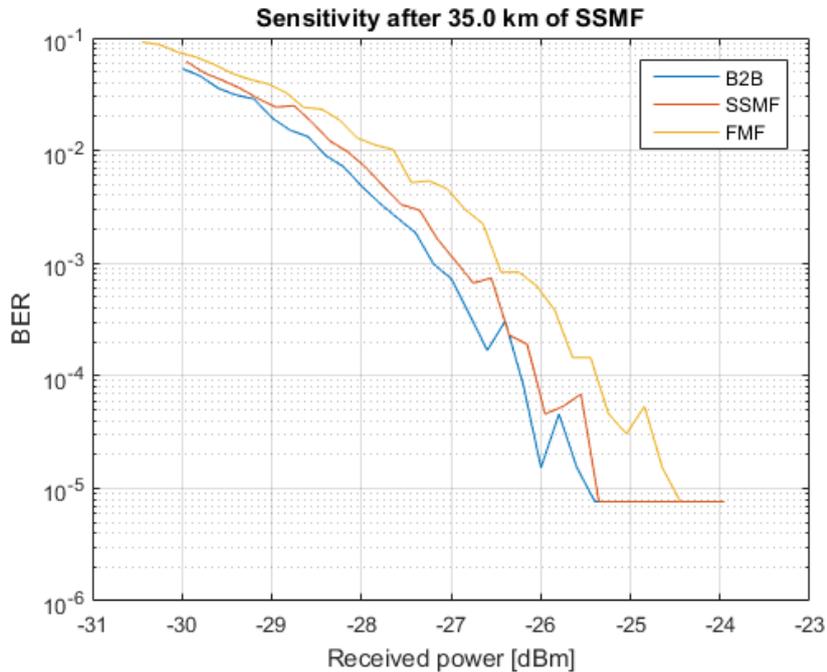


En las anteriores gráficas se hizo la variación de la atenuación de la fibra, lo cual afecta a las señales que entran más sin embargo el comportamiento para una SMF o FMF varía. Como se observa los cambios más significativos se dan en la señal del dominio del tiempo donde la salida de la SMF sufre una disminución en relación a la señal de la fibra de pocos modos en la medida que se va aumentando el parámetro de atenuación y por su parte el espectro de potencia presenta leves disminuciones en para algunas frecuencias.

De otra manera se dispone del código desarrollado en MATLAB para la evaluación mediante el BER y la potencia recibida de una transmisión hecha utilizando SMF, FMF

y al igual haciendo la respectiva evaluación cuando no existiera dicho medio, este código al igual se encuentra en el capítulo de Anexos para entrar en detalle (6.3 Simulación F.O. con Modulación OOK)

**Figura 22. BER vs Sensibilidad FMF-SMF-B2B**



Como se aprecia en la anterior gráfica se tiene una herramienta como el BER para evaluar el comportamiento de cada una de las transmisiones hechas bajo diferente medio o con algunas características adicionales como es el caso de la F.O. de un solo modo o de pocos modos o la comunicación back to back; de esta manera se puede analizar que:

- La comunicación que presenta peor BER es la transmitida por la fibra FMF, puesto que con una misma potencia de recepción (sensibilidad) se puede observar BER muy bajos lo cual podría dar a pensar que la comunicación es sensible a fallas o pérdida de información con un porcentaje alto; sin embargo esto se puede justificar al igual por la distancia que se manejó en dicha simulación.
- La comunicación mediante la SMF tiene un parámetro BER mejor en relación a la comunicación con FMF y esto es comprensible ya que dicha fibra tiene características por su estructura física que desenlazan en parámetros ópticos óptimos para distancias grandes, al menos mayores a las que puede manejar una comunicación por FMF.
- En la simulación al igual se puede apreciar el comportamiento de una comunicación back to back finalmente, donde se observa que el parámetro BER es mejor en comparación al utilizado en los anteriores caso con F.O. ; seguramente en este caso se penalizaría la velocidad de transmisión con la que la información estaría llegando al receptor.
- A pesar que las prestaciones que muestra la comunicación mediante FMF no son las mejores si se evalúa el BER, si hay que considerar que se pueden transmitir en bloque varios modos y que por lo cual el volumen de información será mayor a la hora de transmitir en comparación a los otros dos tipos de transmisión.

## 5. Conclusiones

### 5.1 Conclusiones

- Una de las enseñanzas más grandes que deja este trabajo es el manejo de las expresiones matemáticas en relación al análisis del comportamiento de la fibra óptica como medio dispersivo no lineal cuando las señales de entrada son pulsos de duración corta. Hay que entender muy bien lo que expresiones como la NLSE o Ecuaciones de Manakov para así mismo poder hacer la adaptación en el momento de generar la simulación y poder tener claro los conceptos que se manejan implícitamente.
- La rutina SSPROP hecha por la Universidad de Maryland es una herramienta de gran utilidad ya que mediante el SSFM se logra dar solución a las ecuaciones anteriormente descritas.
- Este tipo de proyectos y simulaciones son de gran utilidad para el abordaje de nuevos medios y modelos a usar en sistemas de comunicaciones ya que la demanda de los usuarios crece día a día y la información es mayor; la idea es continuar con la investigación y los análisis respectivos en la simulación y variación de parámetros.
- Una reflexión que se puede generar a partir del trabajo que se hizo es básicamente que los objetivos planteados inicialmente al tratar de abordar más modos no fue del todo éxitos ya que el trabajo matemático y de expresiones es bastante fuerte, lo cual conllevó más tiempo del previsto y por lo tanto a cambiar la cantidad de modos a simular.

## 5.2 Líneas Futuras

- Incrementar el número de modos en la simulación pudiendo extenderse hasta un número de 7 modos
- Adaptar las expresiones de Manakov para el incremento de modos de transmisión con la rutina SSPROP implementando el método SSF
- Analizar el comportamiento de los diferentes modos que se puedan implementar y hacer una comparativa entre los mismos y en relación a una comunicación basada en SMF.
- Adicionar al código de la simulación FMF las diferentes etapas a tener en cuenta en un sistema de transmisión cuando las distancias son grandes, esquemas de modulación, recepción, entre otros.

## 6. Bibliografía

- [1] S. Salvatore, Redes de fibra óptica, PID\_00194285 UOC.
- [2] [http://grupos.unican.es/gif/sco3/SCO3\\_T2\\_canal\\_0607\\_2tpp.pdf](http://grupos.unican.es/gif/sco3/SCO3_T2_canal_0607_2tpp.pdf). Abril de 2017.
- [3] [http://www.tfo.upm.es/docencia/2007-08/LIBRO\\_LCOP/Desarrollo\\_PE4.pdf](http://www.tfo.upm.es/docencia/2007-08/LIBRO_LCOP/Desarrollo_PE4.pdf). Abril de 2017.
- [4] Agrawal, Govind P. Nonlinear Fiber Optics, Third Edition, Academic Press.
- [5] [https://www.researchgate.net/publication/23816619\\_Self-Steepening\\_of\\_Light\\_Pulses](https://www.researchgate.net/publication/23816619_Self-Steepening_of_Light_Pulses).
- [6] López, Ruano E. Estudio teórico y simulación de un OTDR para sistemas de comunicaciones por fibra óptica, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] Gomez, Castellanos I.- Rodriguez, Dagnino R., “Intensity distributions and cutoff frequencies of linearly polarized modes for a step-index elliptical optical fiber”, SPIE Optical Engineering, vol. 46, no. 4, Abril 2007.
- [8].<http://www.optics.rochester.edu/workgroups/agrawal/grouphomepage.php?pageid=ssoftware>. Abril de 2017.
- [9] Mumtaz, Sami. Agrawal, Govind P.”Nonlinear Propagation in Multimode and Multicore Fibers: Generalization of the Manakov Equations”. Journal of Lightwave Technology, Vol 31. 2013.
- [10] <https://www.photonics.umd.edu/software/ssprop/>
- [11] Agrawal, Govind P. Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition, Academic Press.
- [12] Garrido, Holgado J.-Fabrega, Sánchez J. Diseño y simulación de sistemas OFDM/A ópticos para redes de nueva generación.CTTC-UOC. 2015.
- [13]<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11641/fichero/Volumen+1%252F4.+Simulaciones.pdf>. 06/05/2017
- [14] [http://oa.upm.es/22573/1/PFC\\_EDUARDO\\_LOPEZ\\_RUANO.pdf](http://oa.upm.es/22573/1/PFC_EDUARDO_LOPEZ_RUANO.pdf). 06/05/2017
- [15] <http://www.c3comunicaciones.es/Documentacion/Alcance%20fo.pdf>. 07/05/2017
- [16] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

# 7. Anexos

## 7.1 SSPPROPV Modificado

```
function [u1x,u1y] =
sspropv(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,psp,method,
maxiter,tol);

if (nargin<10)
    error('Not enough input arguments')
end

if (nargin<11)
    psp = [0,0];
end

if (nargin<12)
    method='elliptical';
end

if (nargin<13)
    maxiter = 4;
end

if (nargin<14)
    tol = 1e-5;
end

nt = length(u0x);
w = 2*pi*[(0:nt/2-1),(-nt/2:-1)]/(dt*nt) ;

if isscalar(psp)
    psi = psp(1);           % Orientation of birefringent axes
    chi = 0;                % (linear birefringence)
else
    psi = psp(1);           % Orientation of polarization ellipse
    chi = psp(2);           % Ellipticity parameter
end

if (length(alphaa) == nt) % If the user manually specifies
alpha(w)
    ha = -alphaa/2;
else
    ha = 0;
    for ii = 0:length(alphaa)-1;
        ha = ha - alphaa(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
    ha = ha/2;
end

if (length(betapa) == nt) % If the user manually specifies
beta(w)
    ha = ha - j*betapa;
else
    for ii = 0:length(betapa)-1;
        ha = ha - j*betapa(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end
```

```

end

ha = exp(ha.*dz/2); % ha = exp[(-alphaa/2 - j*betaa)*dz/2]

if (length(alphab) == nt)
    hb = -alphab/2;
else
    hb = 0;
    for ii = 0:length(alphab)-1;
        hb = hb - alphab(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
    hb = hb/2;
end

if (length(betapb) == nt)
    hb = hb - j*betapb;
else
    for ii = 0:length(betapb)-1;
        hb = hb - j*betapb(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end

hb = exp(hb.*dz/2); % hb = exp[(-alphab/2 - j*betab)*dz/2]

if strcmp(method,'circular')    %% CIRCULAR BASIS METHOD %%

    % First, rotate coordinates to circular basis:
    u0a = transpose((1/sqrt(2)).*(u0x + j*u0y));
    u0b = transpose((1/sqrt(2)).*(j*u0x + u0y));

    % Propagation matrix for linear calculations

    h11 = ( (1+sin(2*chi))*ha + (1-sin(2*chi))*hb )/2;
    h12 = -j*exp(+j*2*psi)*cos(2*chi)*(ha-hb)/2;
    h21 = +j*exp(-j*2*psi)*cos(2*chi)*(ha-hb)/2;
    h22 = ( (1-sin(2*chi))*ha + (1+sin(2*chi))*hb )/2;

    u1a = u0a;
    u1b = u0b;
    uafft = fft(u0a);
    ubfft = fft(u0b);
    tinit=tic;
    for iz = 1:nz,
        % Calculate 1st linear half
        uahalf = ifft( h11.*uafft + h12.*ubfft );
        ubhalf = ifft( h21.*uafft + h22.*ubfft );
        for ii = 1:maxiter,
            % Calculate nonlinear section
            fpppp=1.0573;
            fmmpp=0.35;
            uva = uahalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz).* ...
                ( (8*fpppp/3)*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2
+ ...
                4*fmmpp*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 )
);
            uvb = ubhalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz).* ...
                ( (8*fpppp/3)*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2
+ ...

```

```

);
    4*fmmpp*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 )
    uva = fft(uva);
    uvb = fft(uvb);
    % Calculate 2nd linear half
    uafft = h11.*uva + h12.*uvb;
    ubfft = h21.*uva + h22.*uvb;
    uva = ifft(uafft);
    uvb = ifft(ubfft);

    if ( ( sqrt(norm(uva-u1a,2).^2+norm(uvb-ulb,2).^2) / ...
          sqrt(norm(u1a,2).^2+norm(u1b,2).^2) ) < tol )
        % tolerances met, break loop
        u1a = uva;
        u1b = uvb;
        break;
    else
        % tolerances not met, repeat loop
        u1a = uva;
        u1b = uvb;
    end
end %end convergence iteration
if (ii == maxiter)
    warning(sprintf('Failed to converge to %f in %d
iterations',...
                    tol,maxiter));
end
u0a = u1a;
u0b = u1b;
if(toc(tinit)>10)
    strout=sprintf('Propagating through fiber: %2f complete.',
100*iz/nz);
    disp(strout);
    tinit=tic;
end
end %end step iteration

% Rotate back to x-y basis:
u1x = (1/sqrt(2)).*(u1a-j*u1b) ;
u1y = (1/sqrt(2)).*(-j*u1a+u1b) ;

elseif strcmp(method,'elliptical')    %% ELLIPTICAL BASIS METHOD %%
    % First, rotate coordinates to elliptical basis of eigenstates:

    u0a = ( cos(psi)*cos(chi) - j*sin(psi)*sin(chi))*u0x + ...
           ( sin(psi)*cos(chi) + j*cos(psi)*sin(chi))*u0y;
    u0b = (-sin(psi)*cos(chi) + j*cos(psi)*sin(chi))*u0x + ...
           ( cos(psi)*cos(chi) + j*sin(psi)*sin(chi))*u0y;

    u1a = u0a;
    u1b = u0b;
    uafft = fft(u0a);
    ubfft = fft(u0b);
    tinit=tic;
    for iz = 1:nz,
        % Calculate 1st linear half
        uahalf = ifft( ha.*uafft );
        ubhalf = ifft( hb.*ubfft );
        for ii = 1:maxiter,

```

```

    % Calculate nonlinear section
    uva = uahalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz). * ...
        ( (2 +
cos(2*chi)^2)*(abs(u0a).^2+abs(ula).^2)/2 + ...

(2+2*sin(2*chi)^2)*(abs(u0b).^2+abs(ulb).^2)/2 ) );
    uvb = ubhalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz). * ...
        ( (2 +
cos(2*chi)^2)*(abs(u0b).^2+abs(ulb).^2)/2 + ...

(2+2*sin(2*chi)^2)*(abs(u0a).^2+abs(ula).^2)/2 ) );
    uva = fft(uva);
    uvb = fft(uvb);
    % Calculate 2nd linear half
    uafft = ha.*uva;
    ubfft = hb.*uvb;
    uva = ifft(uafft);
    uvb = ifft(ubfft);

    if ( ( sqrt(norm(uva-ula,2).^2+norm(uvb-ulb,2).^2) / ...
        sqrt(norm(ula,2).^2+norm(ulb,2).^2) ) < tol )
        % tolerances met, break loop
        ula = uva;
        ulb = uvb;
        break;
    else
        % tolerances not met, repeat loop
        ula = uva;
        ulb = uvb;
    end
end %end convergence iteration
if (ii == maxiter)
    warning(sprintf('Failed to converge to %f in %d
iterations',...
                    tol,maxiter));
end
u0a = ula;
u0b = ulb;
if(toc(tinit)>10)
    strout=sprintf('Propagating through fiber: %2f complete.',
100*iz/nz);
    disp(strout);
    tinit=tic;
end
end %end step iteration

% Convert back from elliptical basis to linear basis:

ulx = ( cos(psi)*cos(chi) + j*sin(psi)*sin(chi))*ula + ...
        (-sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*ulb;
uly = ( sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*ula + ...
        ( cos(psi)*cos(chi) - j*sin(psi)*sin(chi))*ulb;

else
    error('Invalid method specified: %s\n', method);
end
end

```

## 7.2 Código Simulación FMF (2 Modos)

```

%Programa para simulación de fibra optica de pocos modos
clear all; close all;

%Definición de parámetros del sistema

tasa_bits = 100e9;           % Bit rate
T = 1e5/tasa_bits;          % Periodo
nt = 2^12;                  % numero de puntos
dt = T/nt;                  % timestep
t = ((1:nt)'-(nt+1)/2)*dt; % vector tiempo
w = wspace(T,nt);          % vector de frecuencia angular
vs = fftshift(w/(2*pi));    % frequency (shifted for plotting)
z = 50e3;                   % distancia total [m]
nz = 1e3;                   % numero de pasos
dz = z/nz;                  % tamaño del paso "stepsize"

%Definición de las Señales de Entrada, se utilizarán pulsos
gaussianos con
%chirp = 0

Pol=1; % Amplitud del pulso gaussiano 1
t0x=1e-09; % Anchura del pulso 1er entrada
u0x=Pol*exp(-t.^2/(2*(t0x^2))); % pulso gaussiano 1
u0y=u0x; % pulso gaussiano 2

% Definición de los parámetros físicos de la F.O.

c = 3e8; % [m/sec] velocidad de la luz
lambda = 1550*1e-9; % [m] Longitud de Onda para trabajar en FMF
alphadB = 0; % [dB/m] Atenuación en dB de la F.O.
alpha = alphadB/(10*log10(exp(1)));
alphaa = alphadB/(10*log10(exp(1))); % Atenuación lineal F.O. Estado
de Polarización
alphab = alphadB/(10*log10(exp(1))); % Atenuación lineal F.O.
D = 22e-6; % [s/m^2] Dispersión para F.O. en el modo LP11
S = 0.064*10e3; % [s/m^2] slope para F.O. en el modo LP11

% Coeficientes de dispersión de la F.O.

beta2=-((D*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Calculo de factor beta2 a partir
de la expresión de la dispersión cromática.
beta3=((S*lambda^4)/(4*(pi^2)*(c^2)))-beta2*lambda^2/(pi*c);%
Calculo de factor beta3 a partir del factor beta2

n2=2.6e-20; % [m^2/W] Indice de no linealidad
Aeff=76e-12; % [m^2] Área efectiva de acuerdo a la hoja de
especificaciones de la F.O.en el modo LP11
gamma= 2*pi*n2/(Aeff*lambda); % Coeficiente de No linealidad de la
F.O.

% Propagación en la F.O.

```

```

betapa=[0, 0, beta2, beta3]; % Vector de Dispersión "a"
betapb=[0, 0, beta2, beta3]; % Vector de Dispersión "b"

% Calculo de la propagación a través de la fibra monomodo
tic;
[ulxm]=ssprop(u0x, dt, dz, nz, alphaa, betapa, gamma);
toc;

% Calculo de la propagación a través de la FMF
tic;
[ulx,uly] =
sspropv2(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,0,'circu
lar');
toc;

% Gráfica de señales del sistema
subplot(221);
plot(t/1e-9,20*log10(abs(u0x)),t/1e-9,20*log10(abs(u0y)));
grid on;
xlabel('Time [ns]');
ylabel('Power [dBw]');
title('Pulsos Gaussianos de Entrada');

subplot(222); %gráfica salida señales
plot(t/1e-9,20*log10(abs(ulx)),t/1e-9,20*log10(abs(uly)),t/1e-
9,20*log10(abs(ulxm)));
grid on;
xlabel('Time [ns]');
ylabel('Power [dBw]');
title('Pulsos de Salida');
legend('LP11a FMF', 'LP11b FMF', 'LP01 SMF');

subplot(223); %gráfica espectros de entrada
U0X = fftshift(abs(dt*fft(u0x)/sqrt(2*pi)).^2); % Espectro de
potencia de entrada señal u0x
U0Y = fftshift(abs(dt*fft(u0y)/sqrt(2*pi)).^2); % Espectro de
potencia de entrada señal u0y
plot(vs/10e9,10*log10(U0X),vs/10e9,10*log10(U0Y));
grid on;
xlabel('Frecuencia [GHz]');
ylabel('Espectro de Potencia de Entrada');
title('Espectro de Pulso Inicial');

subplot(224); % gráfica espectros de salida
U1X = fftshift(abs(dt*fft(ulx)/sqrt(2*pi)).^2); % Espectro potencia
de salida señal ulx
U1Y = fftshift(abs(dt*fft(uly)/sqrt(2*pi)).^2); % Espectro potencia
de salida señal uly
U1XM = fftshift(abs(dt*fft(ulxm)/sqrt(2*pi)).^2); % Espectro
potencia de salida señal ulxm
plot(vs/10e9,10*log10(U1X),vs/10e9,10*log10(U1Y),
vs/10e9,10*log10(U1XM));
grid on;
xlabel('Frecuencia [GHz]');
ylabel('Espectro de Potencia de Salida');
title('Espectro de Pulso Final');
legend('LP11a FMF', 'LP11b FMF', 'LP01 SMF');

```

### 7.3 Simulación F.O. con Modulación OOK

```
% This program simulates a 50 km OOK

clear all; close all;

%=====
% Define Time Window and Frequency Window
%=====
Rb=10e9; %bitrate

time_window = 128*1024/Rb;
fs=80e9; % sampling frequency
dt = 1/fs; % sample time
time = (0:dt:(time_window-dt)); % time variable
tl=length(time); % total number of samples
spb= fs/Rb; % samples per bit
nb=floor(tl/spb); % total number of bits

%=====
% Define Input Signal
%=====
% Define the data source
bits=load( 'singprbs15.txt'); % load a PRBS: singprbs15.txt for
2^15-1

% Just check if the time window is larger than the PRBS source
length and
% concatenate data if needed
if nb<=length(bits)
    data=bits(1:nb);
else
    data=[];
    for k=1:1:floor(nb/length(bits)),
        data=[data, bits];
    end
    excess=mod(nb, length(bits));
    data=[data, bits(1:excess)];
end

% resample and shape data using a rectangular pulse
for k=1:1:spb,
    data_aux(k:spb:spb*(length(data)-1)+k)=data;
end

%add zeros to fit the time window length
es=tl-nb*spb;%excess samples
datasig=[zeros(1,es),data_aux,zeros(1,es)];

%=====
% Generate the optical field using an ideal laser
```

```

%=====
laser_power=2e-3; % Laser output power [W]
laser_linewidth=10e6; % Laser linewidth [Hz]
Ei=laser_cw(laser_power, laser_linewidth, t1, fs);

%=====
% Modulate laser output
%=====
ERdB=30; %Extinction Ratio [dB]
Em=modulator(ERdB, Ei, datasig);

%=====
% Define Physical Parameters of the Fiber
% (using SSMF)
%=====
c = 3e8; %[m/sec] speed of light
lambda0 = 1550*1e-9; %[m] center wavelength
alphadB = 0.2*1e-3; % [dB/m] fiber attenuation
alpha = alphadB/(10*log10(exp(1)));
Dp = 17e-6; % [s/m^2] dispersion parameter
S = 0.07*10e3; % [s/m^2] dispersion slope

% Fiber dispersion coefficients
beta2=-((Dp*(lambda0^2))/(2*pi*c));
beta3=((S*lambda0^4)/(4*(pi^2)*(c^2)))-beta2*lambda0^2/(pi*c);

n2=2.6e-20; %[m^2/W] non-linear index
Aeff=80e-12; %[m^2] core area
gamma= 2*pi*n2/(Aeff*lambda0); % Fiber non-linearity coefficient

fiber_length=35e3; % [m]
max_deltaz=1e3;% [m]
max_phase_change=.05; % [degrees]

%=====
% Propagation through fiber
%=====

betap=[0, 0, beta2, beta3]; % Dispersion array

%Define fiber length increment and number of steps
deltaz=max_phase_change*(pi/180)/(gamma*max(abs(Em).^2));
if deltaz>max_deltaz
    deltaz=max_deltaz;
end
step_num=fiber_length/deltaz;

% Compute propagation through fiber (SMF)
Ef_SMF = transpose(ssprop(transpose(Em), dt,deltaz,step_num, alpha,
betap,gamma, 100, 1e-5));

%=====
% Define Physical Parameters of the Fiber
% (using FMF)
%=====
c = 3e8; %[m/sec] speed of light
lambda0 = 1550*1e-9; %[m] center wavelength
alphadB = 0.7*1e-3; % [dB/m] fiber attenuation
alpha = alphadB/(10*log10(exp(1)));

```

```

Dp = 27.3e-6; % [s/m^2] dispersion parameter
S= 0.064*10e3; % [s/m^2] dispersion slope

% Fiber dispersion coefficients
beta2=-((Dp*(lambda0^2))/(2*pi*c));
beta3=((S*lambda0^4)/(4*(pi^2)*(c^2)))-beta2*lambda0^2/(pi*c);

n2=2.6e-20; % [m^2/W] non-linear index
Aeff=76e-12; % [m^2] core area
gamma= 2*pi*n2/(Aeff*lambda0); % Fiber non-linearity coefficient

fiber_length=35e3; % [m]
max_deltaz=1e3;% [m]
max_phase_change=.05; % [degrees]

%=====
% Propagation through fiber
%=====

betap=[0, 0, beta2, beta3]; % Dispersion array

%Define fiber length increment and number of steps
deltaz=max_phase_change*(pi/180)/(gamma*max(abs(Em).^2));
if deltaz>max_deltaz
    deltaz=max_deltaz;
end
step_num=fiber_length/deltaz;

% Compute propagation through fiber (FMF)
[Ef_FMFa, Ef_FMFb] = sspropv2(transpose(Em), transpose(fliplr(Em)),
dt,deltaz,step_num, alpha, alpha, betap, betap,gamma,0, 'circular',
100, 1e-5);

% Attenuator settings
attdB=17:.2:23;
BER_theo=zeros(1,length(attdB));
BER=zeros(1, length(attdB));
power=zeros(1, length(attdB));

disp('Starting sensitivity measurement...');
tinit=tic; % needed for displaying progress
Ef=Ef_SMF;
for l=1:length(attdB),

    %=====
    % Attenuate
    %=====
    att = sqrt(10^(-attdB(l)/10));
    Er=att*Ef;

    %=====
    % APD Photodetector
    %=====
    Responsivity=0.7;
    M=7;
    Rl=50; % Impedance [Ohm]
    Id=1e-12; % dark current [A]
    T=300; % [Å°K] Room temperature

```

```

FndB=4.7; % Noise figure [dB]
ka=1; % Ionization coefficient (worst case = 1)

Ir=APD(Er, Responsivity, 1, M, Rl, Id, T, FndB, fs);

%=====
% Filter data output
%=====
[Ba, Aa]=besself(5, 2*pi*0.8*Rb); % Bessel 5th order .8*Bitrate
[B,A]=impinvar(Ba,Aa,fs); % Convert to digital
Io=filter(B, A, Ir); % filter

% Store data for displaying eyediagram
if att==sqrt(10^(-attdB(1)/10))
    eye1=Io(128:4096);
end

%=====
% Compute the BER
%=====
BER(1)=BER_OOK_real(Io, data, spb);

%=====
% Compute the received power
%=====
power_mW=mean(abs(Er).^2)/1e-3;
power(1)=10*log10(power_mW);

% Display progress of the BER measurement
if toc(tinit)>10
    s=sprintf('Measuring sensitivity: %0.2f%% complete.',
100*1/length(attdB));
    disp(s);
    tinit=tic;
end

end

power_SMF=power;
BER_SMF=BER;

BER=zeros(1, length(attdB));
power=zeros(1, length(attdB));

Ef=Ef_FMFa;
attdB=0:.2:6;
for l=1:1:length(attdB),

%=====
% Attenuate
%=====
att = sqrt(10^(-attdB(l)/10));
Er=att*Ef;

```

```

%=====
% APD Photodetector
%=====
Responsivity=0.7;
M=7;
Rl=50; % Impedance [Ohm]
Id=1e-12; % dark current [A]
T=300; % [Å°K] Room temperature
FndB=4.7; % Noise figure [dB]
ka=1; % Ionization coefficient (worst case = 1)

Ir=APD(Er, Responsivity, 1, M, Rl, Id, T, FndB, fs);

%=====
% Filter data output
%=====
[Ba, Aa]=besself(5, 2*pi*0.8*Rb); % Bessel 5th order .8*Bitrate
[B,A]=impinvar(Ba,Aa,fs); % Convert to digital
Io=filter(B, A, Ir); % filter

% Store data for displaying eyediagram
if att==sqrt(10^(-attdB(1)/10))
    eyel=Io(128:4096);
end

%=====
% Compute the BER
%=====
BER(1)=BER_OOK_real(Io, data, spb);

%=====
% Compute the received power
%=====
power_mW=mean(abs(Er).^2)/1e-3;
power(1)=10*log10(power_mW);

% Display progress of the BER measurement
if toc(tinit)>10
    s=sprintf('Measuring sensitivity: %0.2f%% complete.',
100*1/length(attdB));
    disp(s);
    tinit=tic;
end

end
power_FMFa=power;
BER_FMFa=BER;

BER=zeros(1, length(attdB));
power=zeros(1, length(attdB));

Ef=Em;
attdB=24:.2:30;

```

```

for l=1:1:length(attdB),

%=====
% Attenuate
%=====
att = sqrt(10^(-attdB(l)/10));
Er=att*Ef;

%=====
% APD Photodetector
%=====
Responsivity=0.7;
M=7;
Rl=50; % Impedance [Ohm]
Id=1e-12; % dark current [A]
T=300; % [Å°K] Room temperature
FndB=4.7; % Noise figure [dB]
ka=1; % Ionization coefficient (worst case = 1)

Ir=APD(Er, Responsivity, 1, M, Rl, Id, T, FndB, fs);

%=====
% Filter data output
%=====
[Ba, Aa]=besself(5, 2*pi*0.8*Rb); % Bessel 5th order .8*Bitrate
[B,A]=impinvar(Ba,Aa,fs); % Convert to digital
Io=filter(B, A, Ir); % filter

% Store data for displaying eyediagram
if att==sqrt(10^(-attdB(l)/10))
    eyel=Io(128:4096);
end

%=====
% Compute the BER
%=====
BER(l)=BER_OOK_real(Io, data, spb);

%=====
% Compute the received power
%=====
power_mW=mean(abs(Er).^2)/1e-3;
power(l)=10*log10(power_mW);

% Display progress of the BER measurement
if toc(tinit)>10
    s=sprintf('Measuring sensitivity: %0.2f%% complete.',
100*l/length(attdB));
    disp(s);
    tinit=tic;
end

end

```

```

power_b2b=power;
BER_b2b=BER;

disp('Sensitivity measurement complete.');
```

```

%=====
% Display the results
%=====

% Sensitivity curve
semilogy(power_b2b, BER_b2b, power_SMF, BER_SMF, power_FMFa,
BER_FMFa);
s=sprintf('Sensitivity after %0.1f km of SSMF', fiber_length/1e3);
title(s);
xlabel('Received power [dBm]');
ylabel('BER');
grid on;
%axis([min(power) max(power) 1e-5 1e-1]);
legend('B2B', 'SSMF', 'FMF');
```

### 6.3.1 Función Laser\_cw

```

function Eo = laser_cw(Po, linewidth, nsamples, fs)

sigma_pn=sqrt(2*pi*linewidth*fs);
fn=sigma_pn*randn(1, nsamples);
pn=(1/fs)*cumsum(fn);

Eo=sqrt(Po)*exp(1i*pn);
```

### 6.3.2 Función Modulator

```

function Eo = modulator(ErdB, Ei, data)

Pin=mean(abs(Ei).^2);
Er=10^(ErdB/10); %Extinction Ratio (linear)
amplitude=(sqrt(1)-sqrt(1/Er))/2;
bias=(sqrt(1)+sqrt(1/Er))/2;

data_Er=amplitude*2*(data-0.5)+bias;
Eo=Ei.*data_Er;
```

### 6.3.3 Función APD

```

function Io = APD(Ei, R, ka, M, Rl, Id, T, Fndb, fs)

Ir=M*R*(abs(Ei).^2);
```

```

% "Bandwidth factor"
bf=0.8; % usual cases (bandwidth 0.8*Rb).
% bf=0.5; % theory: theoretical signal with matched filter
(bandwidth 0.5*Rb).
% bf=0.75; % VPI defaults (bandwidth 0.75*Rb).

%Shot noise
q=1.6e-19; % Electron Charge [C]
Fa= ka*M+(1-ka)*(2-(1/M)); % Excess noise factor
sigma_s=sqrt(bf*2*q*(M^2)*Fa*((Ir/M)+Id)*fs);
lambda=sigma_s.^2; % The variance of a Poisson distribution is
Lambda
Is=poissrnd(lambda,1,length(Ir));

%Thermal noise
kb=1.38e-23; % Boltzmann constant
Fn=10^(Fndb/10);
sigma_t=sqrt(bf*4*fs*kb*T*Fn/Rl);
It=normrnd(0,sigma_t, 1, length(Ir));
Io=Ir+Is+It;%+Is+It;

```

### 6.3.4 Función BER\_OOK\_real

```

function BER = BER_OOK_real(I, data, spb, th, ts)

if (exist('th') && exist('ts'))
    I_th=I(ts:spb:length(I)-spb + ts)-th;
    i1=find(I_th>=0);
    i0=find(I_th<0);
    rec(i1)=1;
    rec(i0)=0;
    Rd=xcorr(rec,data);
    icorr=find(Rd==max(Rd));
    ii=icorr-length(rec);
    iBER=find(rec(ii+1:length(rec))==data(1:length(data)-ii));
    nerrors=length(data)-length(iBER);
    BER=nerrors/length(data);
else
    if exist('th')
        for k=1:1:spb
            I_th=I(k:spb:length(I)-spb + k)-th;
            i1=find(I_th>=0);
            i0=find(I_th<0);
            rec(i1)=1;
            rec(i0)=0;
            Rd=xcorr(rec,data);
            icorr=find(Rd==max(Rd));
            ii=icorr-length(rec);
            iBER=find(rec(ii+1:length(rec))==data(1:length(data)-
ii));
            nerrors=length(data)-length(iBER);
            BERaux(k)=nerrors/length(data);
        end
        BER=min(BERaux);
    else
        npoints=20;
        thstep=(max(I)-min(I))/npoints;
        th=min(I):thstep:max(I);
        for l=1:1:length(th)

```

```

    for k=1:1:spb
        I_th=I(k:spb:length(I)-spb + k)-th(1);
        i1=find(I_th>=0);
        i0=find(I_th<0);
        if isempty(i1)||isempty(i0)
            BERaux(k,1)=.5;
        else
            rec(i1)=1;
            rec(i0)=0;
            Rd=xcorr(rec,data);
            icorr=find(Rd==max(Rd));
            ii=icorr-length(rec);
            if(ii>=0)

iBER=find(rec(ii+1:length(rec))==data(1:length(data)-ii));
                else
                    ii=abs(ii);
                    iBER=find(rec(1:length(rec)-
ii)==data(ii+1:length(data)));
                end
                nerrors=length(data)-length(iBER);
                BERaux(k,1)=nerrors/length(data);
            end
        end
    end
    BER=min(min(BERaux));
end
end
end

```