

# Diseño de un modelo de simulación para la capacidad de enlaces mediante la multiplexación de nodos

**ALUMNO: Pablo Jesús López Méndez**  
Máster en Ingeniería de Telecomunicaciones (UOC)

**CONSULTOR: Josep María Fábrega**  
Profesor en Área de Comunicaciones Ópticas



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

## **GNU Free Documentation License (GNU FDL)**

Copyright © Pablo Jesús López Méndez

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

## **Copyright**

© Pablo Jesús López Méndez

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>	<i>Diseño de un modelo de simulación para la capacidad de enlaces mediante la multiplexación de nodos</i>
<b>Nombre del autor:</b>	<i>Pablo Jesús López Méndez</i>
<b>Nombre del consultor/a:</b>	<i>Josep María Fábrega</i>
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	01/2019
<b>Titulación::</b>	<i>Máster en Ingeniería de Telecomunicación</i>
<b>Área del Trabajo Final:</b>	<i>Comunicaciones Ópticas</i>
<b>Palabras clave</b>	<i>Multiplexación de nodos, enlaces de poco alcance, modulación OOK, capacidad, comportamiento</i>
<b>Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras):</b>	
<p>En este documento se realiza un estudio sobre las capacidades de la Fibra Óptica en cuanto a la multiplexación de modos aplicada sobre la misma. Supone la evolución natural del trabajo de un antiguo compañero dedicado a la Fibra de Pocos Modos (Few Mode Fiber) en el cual se encuentran las bases de esta investigación.</p> <p>El escenario seleccionado para el desarrollo del proyecto consiste en una rutina Matlab denominada SSPROP, desarrollada originalmente por la Universidad de Maryland. Mediante la aplicación de una serie de modificaciones en el código se ha conseguido realizar la multiplexación de modos en la investigación.</p> <p>Como output de la secuencia de código Matlab se obtienen una serie de gráficas simuladas, a partir de las cuales se realiza el análisis crítico y se sacan las conclusiones pertinentes. El objetivo de este trabajo es realizar una comparativa entre la implementación o no implementación de la multiplexación de modos en la Fibra Óptica.</p>	

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

In this document, a study is made about the capabilities of Fiber Optics in terms of the multiplexing of modes applied to it. It supposes the natural evolution of the work of an old teammate dedicated to the Fiber of Few Modes (Few Mode Fiber) in which the bases of this investigation are found.

The selected scenario for the development of the project consists of a Matlab routine called SSPROP, originally developed by the University of Maryland. Through the application of a series of modifications in the code, multiplexing of modes in the investigation has been achieved.

As an output of the Matlab code sequence, a series of simulated graphs are obtained, from which the critical analysis is carried out and the pertinent conclusions are drawn. The objective of this work is to make a comparison between the implementation or non-implementation of multiplexing modes in Fiber Optics.

# Índice

1. Introducción .....	1
1.1 Contexto del Trabajo .....	1
1.2 Objetivos del Trabajo .....	1
1.3 Planificación del Trabajo .....	2
2. Estado del arte .....	6
2.1 La fibra óptica .....	6
2.1.1 Estructura .....	6
2.1.2 Funcionamiento .....	7
2.1.3 Modos guiados.....	8
2.1.4 Tipos de fibra.....	9
2.1.5 Ventajas y desventajas .....	10
2.2 La multiplexación .....	11
2.2.1 Introducción a la multiplexación .....	11
2.2.2 Tipos de multiplexación más empleados .....	11
2.3 NLSE .....	13
3. Ejecución del proyecto .....	14
3.1 Función SSPROP.....	14
3.2 Función SSPROPV2.....	14
4. Simulaciones y resultados .....	15
5. Conclusiones .....	18
6. Bibliografía .....	19
7. Anexo .....	20
7.1 Función SSPROP .....	20
7.2 Función SSPROPV2 .....	21
7.3 Código principal (main) .....	29

# Lista de figuras

Figura 1: Estructura de la fibra óptica .....	6
Figura 2: Reflexión vs Refracción .....	7
Figura 3: Ley de Snell .....	7
Figura 4: Ecuación y condiciones de contorno.....	8
Figura 5: Expresiones matemáticas de 'V' y 'b'.....	8
Figura 6: Curva de V frente a b.....	9
Figura 7: Multiplexación .....	11
Figura 8: FDM .....	12
Figura 9: TDM .....	12
Figura 10: CDM .....	12

# 1. Introducción

## 1.1 Contexto del Trabajo

Se entiende por fibra óptica al medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos, consistente en un hilo de material transparente (vidrios y materiales plásticos en su mayoría) e ínfimo grosor. A través de él son enviados pulsos de luz, procedentes de láser o LED, que poseen la información de los datos a transmitir.

Su uso está muy extendido en el ámbito de las telecomunicaciones, puesto que se permite enviar una gran cantidad de datos a distancias inmensas, con velocidades superiores a las que ofrece el cable convencional. Además ofrece inmunidad a las interferencias de tipo electromagnético, lo que supone una buena robustez en la transmisión.

Los nodos ópticos son el lugar por el que las señales descendentes de la cabecera del usuario pasan a información eléctrica para continuar su camino hacia el hogar del abonado mediante la red de distribución coaxial. En ellos se produce la conversión de la señal óptica del enlace.

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) es una tecnología que nos permite la transmisión de señales independientes a través de la misma fibra óptica, empleando portadoras de diferentes longitudes. Este término hace referencia a portadoras de tipo óptico, mientras que la multiplexación por frecuencia (FDM), generalmente es empleada en aplicaciones de radiofrecuencia.

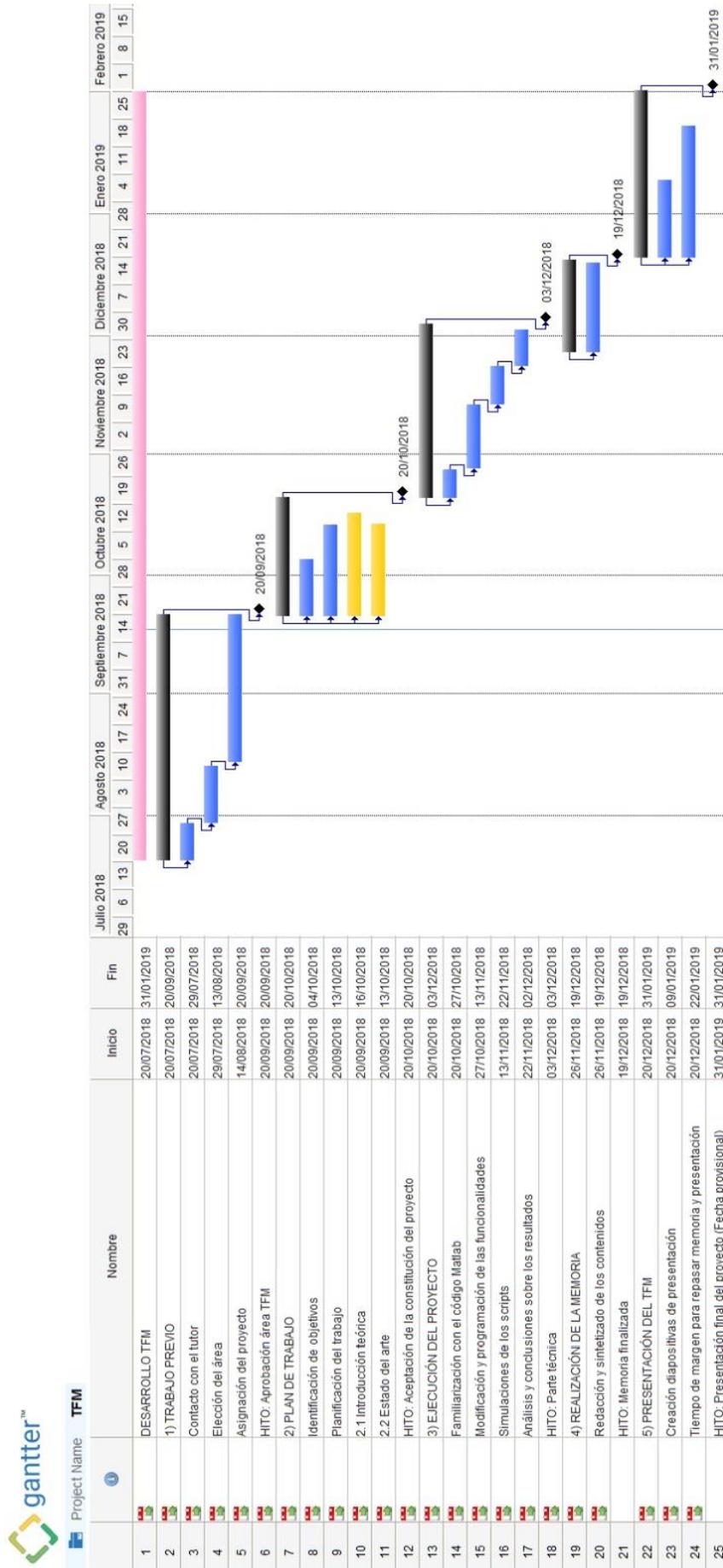
En este trabajo final de máster se propone la continuación de las investigaciones previas de los compañeros en este ámbito, referentes a las fibras de pocos modos, siendo aplicada una adaptación hacia la multiplexación de nodos. En nuestro caso, se diseñarán enlaces de poco alcance y emplearemos modulación OOK, a partir de estas premisas se desarrollará el código en software Matlab y se analizarán los resultados en consecuencia.

Total gratitud a la Universidad Oberta de Catalunya, así como a mi tutor en este proyecto, el profesor Josep María Fábrega por darme la oportunidad de investigar esta materia tan de actualidad hoy en día.

## 1.2 Objetivos del Trabajo

- ✓ Continuación de la investigación previa sobre las fibras de pocos modos (entre 3 y 6)
- ✓ Adaptación y evolución de la misma a multiplexación de nodos
- ✓ Diseño de enlaces de poco alcance (en torno a 25 km), empleando modulación OOK y estudiando su comportamiento
- ✓ Creación de rutinas mediante software Matlab como medio de simulación del comportamiento del proyecto
- ✓ Análisis de la respuesta (output) de los scripts programados

### 1.3 Planificación del Trabajo



Tal y como se plasma en el diagrama de Gantt superior, realizando con la herramienta abierta Ganttter, las etapas del proyecto se espaciarán a lo largo del semestre de la forma más óptima posible. Las fechas y duraciones expuestas en ningún caso son definitivas, puesto que sólo suponen un punto de partida inicial de referencia.

- Desarrollo TFM: Tiempo total de trabajo del TFM, entendido como el primer semestre del curso, incluyendo tanto tareas como tiempo extra de margen para el repaso y perfeccionamiento de las mismas.
- Trabajo previo: Consiste en todas las tareas correspondientes a la búsqueda de área de conocimiento, así como selección del tutor y realización de los trámites preliminares necesarios. Finaliza con el hito de la aprobación inicial.
- Plan de trabajo: Tras la puesta a punto inicial, se identifican los objetivos del trabajo y se planifican las tareas del TFM en consecuencia, lo que desemboca en el hito de aceptación de la constitución del proyecto. Paralelamente, se inician los contenidos teóricos del trabajo como pueden ser el estado del arte y la introducción.
- Ejecución del proyecto: Corresponde a esta parte todo el desarrollo técnico del mismo, es decir, la codificación y programación Matlab del escenario virtual. Evidentemente el análisis de los resultados, así como las conclusiones finales, son referente a esta parte.
- Realización de la memoria: Sintetizado y escritura de todos los conocimientos obtenidos por la investigación, así como purga de errores. También es necesario dar formato e imagen al trabajo como muestra de una buena imagen trabajada adecuadamente.
- Presentación del TFM: Por último se realizará la presentación de diapositivas explicativas del trabajo, que resuman en la medida de lo posible la mayor cantidad de información. Se dejará un tiempo de margen para repasar la memoria, para finalmente acabar con el hito de la presentación final del Trabajo de Fin de Máster.

A continuación se presenta una breve explicación de cada una de las tareas especificadas en el diagrama:

1. Desarrollo TFM: Comprende la totalidad del espacio temporal dedicado al proyecto, así como de todas las subtareas que componen su creación.
2. Trabajo previo: Consiste en la agrupación de las tres tareas siguientes.
3. Contacto con el tutor: Paso preliminar de vital importancia, consistente en el contacto vía e-mail con el profesor Josep María Fábrega, para guiar las directrices del trabajo a llevar a cabo durante el semestre.

4. Elección del área: Evolución natural de la tarea anterior, dirigida al campo de las Comunicaciones Ópticas, rama de especialidad del tutor del TFM.
5. Asignación del proyecto: Última etapa del trabajo previo, que en mi caso ha supuesto la dirección ya mencionada, hacia la fibra óptica y la multiplexación en la misma.
6. Aprobación del área del TFM: Hito que consagra las subtareas referentes al trabajo previo.
7. Plan de trabajo: Consiste en el inicio del proyecto, correspondiéndose a la parte más orientada a la organización, dentro del mismo.
8. Identificación de objetivos: Como su propio nombre indica, consta del ejercicio de distinción de los pasos a seguir para lograr una resolución favorable del trabajo final.
9. Planificación del trabajo: Paso siguiente que consiste en destinar espacios temporales lo más óptimos posible para cada una de las tareas, y consecuciones de los objetivos pertinentes asociados a las mismas.
10. Introducción teórica: Primer parte del TFM, que sirve para contextualizar el marco en el que se llevan a cabo las tareas.
11. Estado del arte: Conjunto de explicaciones referentes a conceptos de fibra óptica y multiplexación, que sirvan para encaminar al lector.
12. Aceptación de la constitución del proyecto: Hito que consagra las tareas referentes al plan de trabajo.
13. Ejecución del proyecto: Tarea principal que consiste en el trabajo de investigación del ámbito seleccionado.
14. Familiarización con el código Matlab: Subtarea que deriva de la anterior y supone el punto de partida fundamental.
15. Modificación y programación de las funcionalidades: Tomando las rutinas de código suministradas, se han de llevar a cabo los cambios oportunos en base a la investigación realizada.
16. Simulaciones de los scripts: Ejecución de las rutinas anteriormente mencionadas.
17. Análisis y conclusiones de los resultados: Observación de los outputs generados por software, así como la consecuente redacción de las explicaciones resumen de las operaciones.

18. Parte técnica: Hito que consagra las tareas referentes a la ejecución del proyecto.
19. Realización de la memoria: Tarea en la que llega la hora de plasmar sobre un documento todos los conocimientos adquiridos por el trabajo.
20. Redacción y sintetizado de los contenidos: Consiste en el trabajo de escribir y dar formato a toda la información antes mencionada.
21. Memoria finalizada: Hito que consagra las tareas referentes a la realización de la memoria.
22. Presentación del TFM: Exposición final pública del trabajo.
23. Creación de diapositivas de presentación: Parte final de nuestro cometido, orientada a dar buena imagen en la presentación.
24. Tiempo de margen para repaso: Espacio temporal extra, destinado a atar los últimos cabos sueltos (en caso de haberlos) durante el semestre.
25. Presentación final del proyecto: Consecución de todos los objetivos anteriores en el interior del plazo deseado.

## 2. Estado del arte

Con el objetivo de comprender más profundamente las bases teóricas de nuestra investigación, se presentan a continuación una serie de conceptos preliminares sobre la fibra óptica, así como otros de gran importancia en el marco de este proyecto.

### 2.1 La fibra óptica

#### 2.1.1 Estructura

Tal y como se expuso en la introducción, la noción de la fibra óptica surge como la manipulación de luz controlada en el interior de un cable. A continuación, se explica detalladamente cómo está compuesta, a fin de obtener una visión global de este medio.

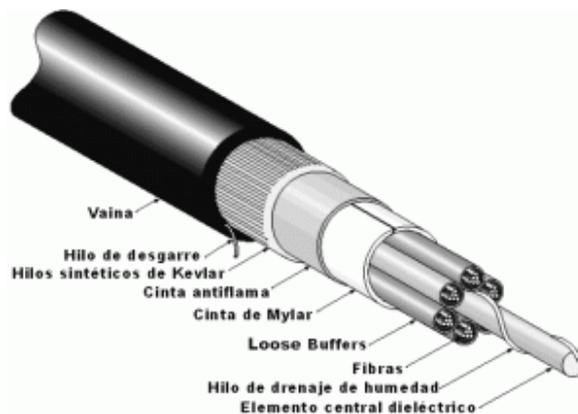


Figura 1: Estructura de la fibra óptica

- Elemento central dieléctrico: Consiste en un filamento dieléctrico (no conductor de la corriente eléctrica) opcional, que sirve de ayuda a la consistencia del propio cable.
- Hilo de drenaje de humedad: Elemento cuya finalidad es dejar pasar la humedad a través de él, librando de la misma al resto de filamentos libres.
- Fibras: Medio por el que se transmite la información dentro del cable, generalmente fabricado en silicio (vidrio) o polímeros muy procesados, gracias a los fenómenos físicos de reflexión y refracción.
- Loose Buffers: Tubo de poco tamaño que recubre la fibra (a veces con gel en su interior), con la finalidad de ejercer de capa oscura que impida que los rayos de luz se dispersen hacia el exterior.
- Cinta de Mylar: Capa de poliéster fina originariamente usada en la transmisión de programas a PC, pero que en este caso solamente cumple el rol de aislante.

- Cinta antillama: Simple cobertor, que sirve para proteger al cable del calor y las posibles llamas.
- Hilos sintéticos de Kevlar: Ayudan en gran medida a la consistencia y protección del cable. El Kevlar es un material de característica buen ignífugo, además de soportar el estiramiento de sus hilos.
- Hilo de desgarrar: Filamentos cuya simple funcionalidad es la ayuda a la consistencia del cable.
- Vaina: Capa superior del cable que provee de aislamiento y consistencia al conjunto que tiene en su interior.

### 2.1.2 Funcionamiento

Cabe destacar a estas alturas dos principios físicos de la óptica que permiten la transmisión en el cable, la reflexión y la refracción.

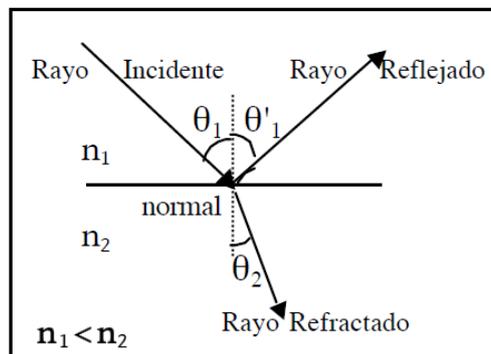


Figura 2: Reflexión vs Refracción

El primero de ellos consiste en el cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre en un mismo medio, después de incidir sobre la superficie de un medio distinto. Este fenómeno se rige por dos principios denominados leyes de la reflexión, tales como que el rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie estén en el mismo plano. Por último, el ángulo del rayo incidente y el reflejado deben ser iguales para cumplirse la reflexión.

El segundo hace referencia al cambio de dirección que ocurre cuando los rayos atraviesan de un medio a otro, en el que la luz se propaga a una velocidad distinta. En esta ocasión las leyes de la refracción determinan su comportamiento tal que el rayo incidente, el refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia, están en el mismo plano. Además la ley de Snell determina la relación entre los ángulos de incidencia y refracción, así como los índices de refracción absolutos de la luz en los dos medios tal que:

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Figura 3: Ley de Snell

### 2.1.3 Modos guiados

Según la Teoría Electromagnética, se definen los modos guiados como aquellos “cuya energía está confinada mayoritariamente en el núcleo de la fibra. La energía transportada en la cubierta es una función evanescente o fuertemente decreciente con la distancia al núcleo”.

Son clasificados de la siguiente manera:

- Modos TE (Transversal Eléctrico): Aquellos en los que no existe componente del campo eléctrico en la dirección de propagación.
- Modos TM (Transversal Magnético): Análogo al anterior, pero en referencia al campo magnético.
- Modos TEM (Transversal Electromagnético): Carecen de componentes de cualquiera de los dos tipos.
- Modos HE/EH: Denominados modos híbridos, cuando los valores de las componentes sean distintos de cero.

Las soluciones a la siguiente ecuación electromagnética, que cumplen las condiciones de contorno de la fibra óptica son los modos guiados que se propagan en la misma, distinguiendo la monomodo (SM, si se propaga 1 sólo modo) y la multimodo (MM, si se propagan más).

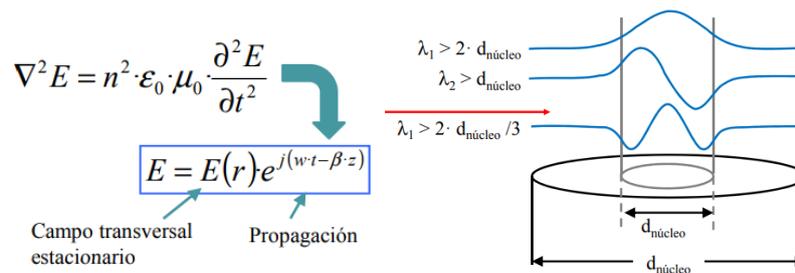


Figura 4: Ecuación y condiciones de contorno

Los parámetros de interés obtenidos a partir de la resolución de las ecuaciones son  $V$  (frecuencia normalizada) y  $b$  (Constante de propagación normalizada), definidos mediante las siguientes expresiones matemáticas:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad b = \frac{(\beta / k_0) - n_2}{n_1 - n_2}$$

Figura 5: Expresiones matemáticas de  $V$  y  $b$

$V$  es una función que toma  $\lambda$  (longitud de onda) y la geometría de la fibra, estableciendo el valor de la frecuencia que se debe alcanzar para que un cierto modo se propague, es decir, deje de estar “al corte”. Cerca de esta condición, la mayor parte de la energía se propaga por la cubierta, lo que adquiere la denominación de modos “poco confinados”.

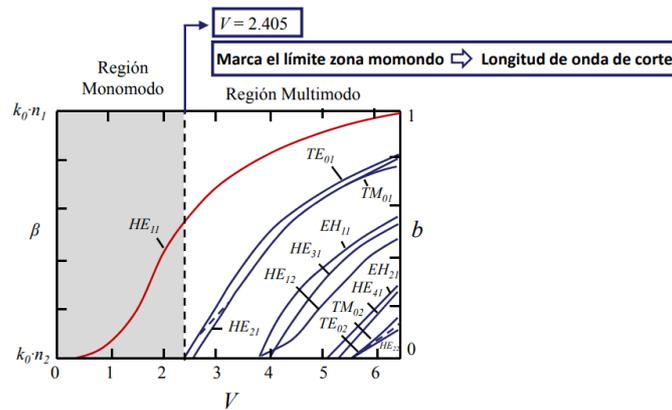


Figura 6: Curva de  $b$  frente a  $V$

Este diagrama supone la curva de ' $b$ ' frente a ' $V$ ' para los modos que se propagan por la fibra, determinando el punto de la región límite de la zona monomodo, dependiente de forma directa de la longitud de la onda de corte.

### 2.1.4 Tipos de fibra

Tras haber introducido los conceptos más elementales de la fibra óptica, nos vamos a centrar en distinguir los tipos existentes de la misma. Según la distinción más clásica encontramos las fibras monomodo, entendidas como aquellas por las que se transmite un sólo haz de luz por el interior de la fibra, y las multimodo. En contraste, como es de suponer, las últimas pueden transmitir varios haces de luz por el interior de la fibra.

No obstante, en los últimos años se han desarrollado nuevos tipos de fibras que permiten la multiplexación en el espacio, ello se consigue guiando diferentes rayos de luz simultáneamente con informaciones diferentes. Entre ellas podemos destacar las siguientes:

- Fibras de múltiples núcleos (multi-core fibers)

Esta nueva fibra óptica, destinada a transmisiones de ultra-larga distancia, ha obtenido nuevos récords en cuanto a baja atenuación y baja dispersión en modo espacial entre las fibras para multiplexado de división espacial. La multiplexación por división espacial (SDM) ha sido intensamente estudiada, y la fibra multi-núcleo (MCF) se prevé como la fibra óptica de próxima generación.

La compañía fabricante (Sumitomo Electric Industries) ha desarrollado una fibra óptica de cuatro u ocho núcleos de puro sílice en un revestimiento estándar de 125 micras, adecuado para interconexiones ópticas, siendo actualmente el cable de fibra óptica de más alta densidad de núcleo jamás registrado.

La fibra se caracteriza por una atenuación de 0.158 dB/km a una longitud de onda de 1.550 nanómetros y un modo de dispersión espacial de 6.1 ps/km en la longitud de onda que va desde los 1520 hasta los 1580 nm. La SDM de 6.1 permite reducir el cálculo de complejidad de los procesadores de señal digital (DSPs) con tecnología MIMO para la compensación de diafonía (crosstalk).

- Fibras de múltiples elementos (multi-element fibers)

Se presenta un enfoque novedoso para implementar la transmisión SDM basada en la tecnología de fibra de elementos múltiples. Los MEF ofrecen una operación sin interferencias eficaz y compatible con sistemas WDM convencionales, y no requieren el desarrollo de ningún componente de multiplexación especial.

Esta tecnología permite unir múltiples fibras dentro de un recubrimiento común, y se puede aplicar a la fabricación de fibras de transmisión pasiva y fibras activas para el desarrollo de módulos de amplificación.

La viabilidad de este enfoque se demostró fabricando y caracterizando 9.5 y 3.07 km de longitud de un 3-MEF pasivo a partir de una plataforma dopada, demostrando una transmisión de datos a 1014 Gbps libre de errores, y destacando la operación libre de diafonía obtenida. Se obtuvo una ganancia máxima de 37 dB con una tolerancia de 2 por elemento de fibra, para 10W de potencia de bombeo lanzada con señal de entrada de -23 dBm.

La tecnología MEF muestra compatibilidad total con los sistemas WDM existentes y suficiente flexibilidad para ser considerado como un contendiente para la implementación de sistemas SDM totalmente funcionales.

- Fibras de pocos modos (few mode fibers)

Las few-mode fibers (FMF) se muestran como suficientemente resistentes al acoplamiento modal en comparación con las fibras multimodo estándar, pero aún pueden tener diámetros de núcleo grandes en comparación con las fibras monomodo. Como resultado, estas fibras pueden tener una no linealidad significativamente menor, y al mismo tiempo tener el mismo rendimiento que las fibras monomodo en términos de dispersión y pérdida.

En ausencia de acoplamiento de modo, es posible utilizar estas fibras en la operación monomodo, donde todos los datos se transportan en sólo uno de los modos espaciales a lo largo de la fibra. La operación monomodo se logra simplemente empalmado fibras a ambos extremos de una fibra dual de 35 km de longitud a 1310 nm. Tras 35 km de transmisión, no se observó dispersión modal o una pérdida excesiva.

La misma fibra es colocada en un circuito de recirculación y se transmiten 3 canales WDM que transportan datos de BPSK a 6 Gbps a través de 1050 km de la few-mode fiber sin dispersión modal.

### **2.1.5 Ventajas y desventajas**

Tras haber explicado los conceptos básicos sobre la fibra óptica en los apartados anteriores, se exponen a continuación una serie de ventajas y desventajas.

Empezando por las primeras, se sabe que posee un alto ancho de banda (superando el Tb por segundo), lo que produce que la transmisión dependa de la capacidad de procesamiento del emisor-receptor más que del medio.

Además se trata de una tecnología multiprotocolo (TCP/IP, SCSI...), escalable, muy segura (puesto que no hay manera de acceder a los datos transmitidos sin romper la fibra), el cable es muy liviano y resistente a la corrosión, ínfimas pérdidas a lo largo del cable...

Sin embargo, la fibra óptica también conlleva una serie de desventajas tales como que el conjunto de conectores, cables, placas y demás dispositivos son muy costosos para el uso comercial. Además la fibra es bastante frágil, lo que complica considerablemente la instalación, sin mencionar que los empalmes entre fibras son muy complejos.

Finalmente siempre será necesario un conversor óptico-eléctrico, ya que es casi imposible tener toda una red de fibra, lo que significa un mayor coste.

## 2.2 La multiplexación

### 2.2.1 Introducción a la multiplexación

La multiplexación consiste en el procedimiento por el cual diferentes informaciones pueden compartir simultáneamente un mismo canal de comunicaciones. Esta técnica viene referida a la habilidad para transmitir datos que provienen de diversos pares de aparatos (transmisores y receptores) denominados canales de velocidad baja en un medio físico único, denominado como canal de alta velocidad.

Se define un multiplexor como el dispositivo empleado para combinar las señales de los transmisores, así como enviarlas a través del canal de alta velocidad. El proceso inverso se denomina demultiplexación, y se entiende como la extracción de una determinada señal de las múltiples encontradas en un cierto canal de comunicaciones.

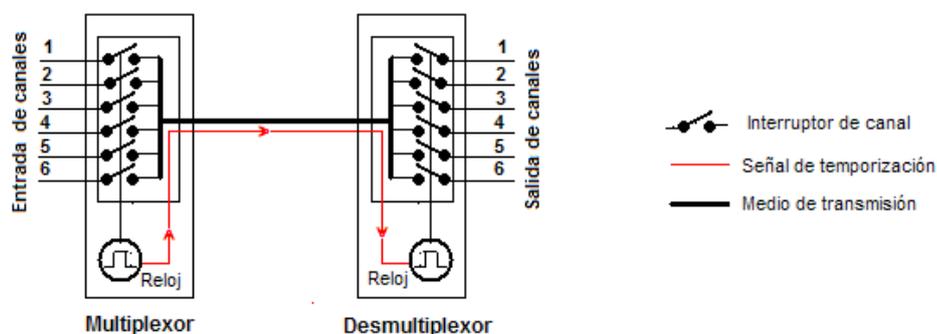


Figura 7: Multiplexación

### 2.2.2 Tipos de multiplexación más empleados

- FDM (en frecuencia): Técnica analógica que se puede aplicar cuando el ancho de banda de un enlace es mayor que los BW combinados de las

señales a transmitir. Cada una de las fuentes genera una señal con un rango frecuencial similar, dentro del MUX, estas señales similares se modulan sobre distintas frecuencias portadoras.

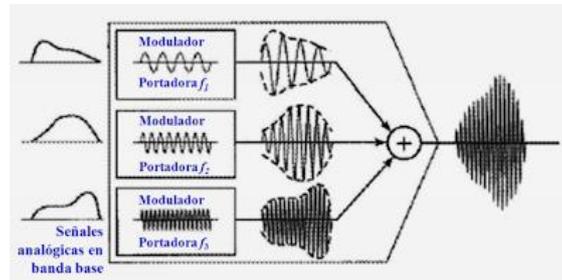


Figura 8: FDM

- WDM (en longitud de onda): Se podría calificar como una variante de la multiplexación en el dominio de la frecuencia, realizada en rangos próximos a la luz. Está basada en que una fibra óptica puede estar simultáneamente iluminada por varias fuentes luminosas, cada una de las cuales transporta información.
- TDM (en tiempo): Consiste en una técnica que permite la transmisión de señales digitales, bajo una idea de ocupación sobre un canal de gran capacidad a partir de distintas fuentes, a fin de obtener un mejor aprovechamiento de la transmisión.

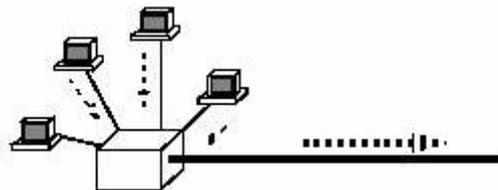


Figura 9: TDM

- CDM (en código): Este tipo de multiplexación es bastante complejo. Está basado en el uso de distintas codificaciones para cada canal, que pueden ser transmitidos compartiendo tiempo y frecuencia de forma simultánea, haciendo uso de complicados algoritmos de codificación.

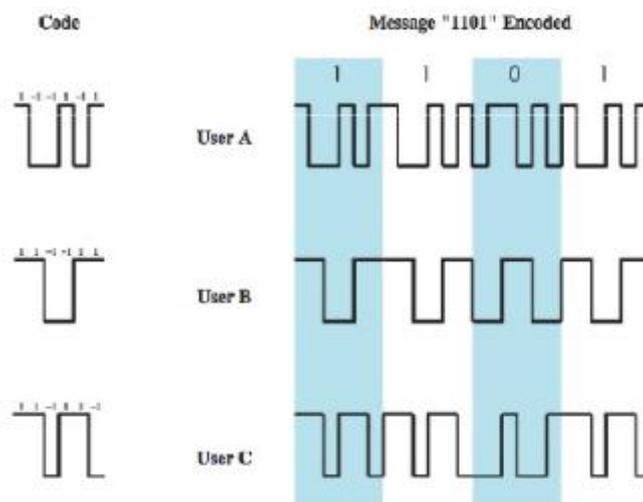


Figura 10: CDM

### 2.3 NLSE

La Ecuación no Lineal de Schrödinger (NLSE en inglés) consiste en una variación aplicada a las ondas planares, proveniente de la ecuación original, es considerada como una de las más importantes en el terreno de las comunicaciones ópticas.

En ella se describe la propagación de las señales a través de medios ópticos y estructuras dispersas de tipo no lineal, en el caso que concierne a esta investigación, la fibra multimodo concretamente. El comportamiento viene regido por la siguiente expresión.

$$\frac{dA(t,z)}{dz} = -\frac{j\beta_2}{2} \frac{d^2 A(t,z)}{dt^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{d^3 A(t,z)}{dt^3} - \frac{\alpha}{2} A(t,z) + j\gamma \left[ |A(t,z)|^2 A(t,z) + \frac{j}{\omega_0} \frac{d(|A|^2 A)}{dt} - T_R \frac{d(|A|^2)}{dt} A \right]$$

En la que se distinguen las siguientes variables:

$\alpha$	Pérdidas en la fibra óptica [1/m]
$\gamma$	No linealidad en la fibra [1/W*m]
$\beta_2$	Dispersión de la fibra de segundo orden [s <sup>2</sup> /m]
$\beta_3$	Dispersión de la fibra de segundo orden [s <sup>3</sup> /m]
$T_R$	Aproximación de respuesta Raman
$\omega_0^{-1}$	Aproximación de efecto Self-Steepening

La ecuación modela una onda de tipo secante hiperbólico, que conocemos como solución de la misma (solitón temporal) con lo que en su propagación, dicho pulso no se modifica. Esto sucede debido a que existe un balance entre la dispersión y la no linealidad del medio de propagación, siempre y cuando sea un solitón fundamental.

Posteriormente se emplea como condición inicial dos ondas tipo secante hiperbólico con una fase y separación relativa, observando lo que sucede en la propagación al alterar cada una de las variables amplitud y fase de la misma. De esta forma se estudia y analiza la relación entre ambos parámetros en los solitones, gracias al empleo de las rutinas de instrucciones en código Matlab.

## 3. Ejecución del Proyecto

### 3.1 Función SSPROP (original)

Como se comentó anteriormente, el entorno del proyecto está basado en una rutina Matlab denominada SSPROP, desarrollada por la Universidad de Maryland. A partir de ella, se han realizado una serie de modificaciones en el código, con vistas a implementar la multiplexación de los nodos en la Fibra Óptica.

La codificación Matlab original consta de una única Ecuación No-Lineal de Schrodinger, en la que podemos apreciar la aplicación del método de Split-Step de Fourier (SSFM). A partir de esta base se realiza la versión modificada siguiente.

### 3.2 Función SSPROPV2 (modificado)

En primer lugar, se extrapola la solución original monomodo a un escenario hipotético de 4 modos, en los que además de analizar la influencia directa de los mismos, se ha tenido en cuenta la influencia cruzada de cada uno con sus vecinos. Con vistas a crear un marco para la investigación lo más simplificado posible, se han seleccionado los pares LP11a/b y LP21a/b.

Por lo que consiste en un entorno de 4 modos degenerados 2 a 2, es decir, el modo LP11a posee un fuerte acoplo con el LP11b (y viceversa)... así como el par LP21a/b. Por consiguiente se ha realizado en código la siguiente asignación:

<b>VARIABLE</b>	<b>MODO</b>
<b>uva</b>	LP11a
<b>uvb</b>	LP11b
<b>uvc</b>	LP21a
<b>uvd</b>	LP21b

Para poder llegar a ello fue necesario aumentar el número original de componentes a simular en el código, existiendo dos posibilidades:

La primera, consistía en modificar la entrada de la función SSPROP para que admitiese más parámetros (señales tonales de input); y la segunda (que fue la seleccionada finalmente), se basaba en sobrescribir las variables singulares del código original con un vector de variables que contuviese todos los nodos de la investigación.

Una vez obtenidas las nuevas variables en la función SSPROPV2 fue necesario adaptar el bucle de simulación de acuerdo a las nuevas condiciones, incluyendo todos los efectos no-lineales entre modos, así como adaptando el parámetro de tolerancia en consecuencia. Todo ello mediante la extrapolación de los comandos pertenecientes al código original de monomodo, al nuevo escenario multimodo.

## 4. Simulaciones y resultados

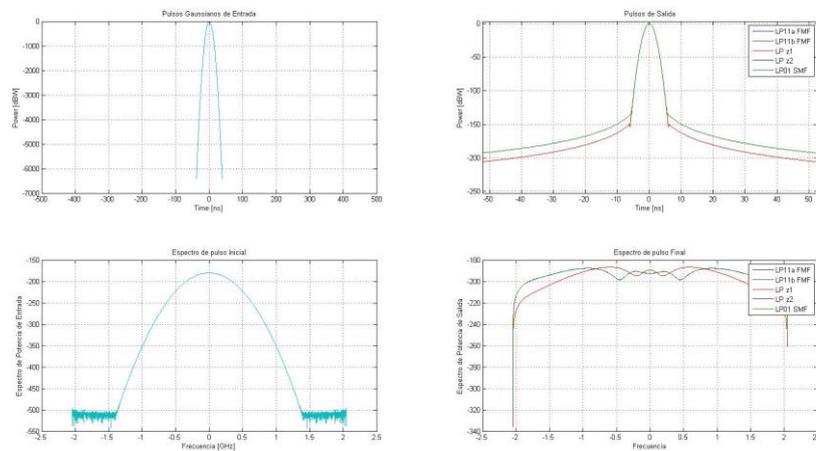
A continuación se exponen las gráficas resultantes de la ejecución del código Matlab anteriormente mencionado (el cual puede ser consultado en los anexos de este trabajo), con los comentarios pertinentes.

En primer lugar cabe destacar que la parte no lineal de las ecuaciones implementadas en la rutina depende fuertemente de la distancia, por lo que es necesario detallar las diferentes medidas que estamos analizando. Así nos será más fácil contemplar los efectos en los pulsos de salida respecto a los de entrada, puesto que a mayor distancia mayor debería ser el acoplo entre los modos. Se han tomado como referencia los rangos de 5, 50 y 500 km.

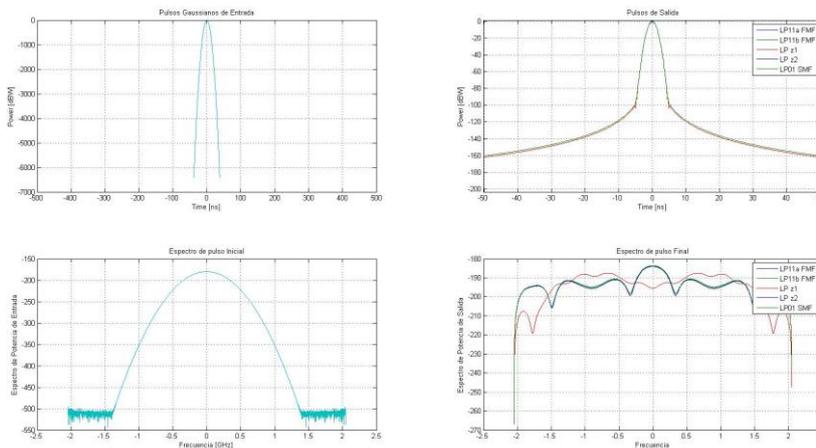
Además también se ha probado a introducir la misma señal (pulso de entrada) en todos y cada uno de los modos, con vistas a facilitar la interpretación de resultados. De esta forma, las diferencias entre pulsos a la salida de la fibra, nos darán mejor idea de si el acoplo se realiza fuertemente o no.

### Comparativa con mismos pulso de entrada

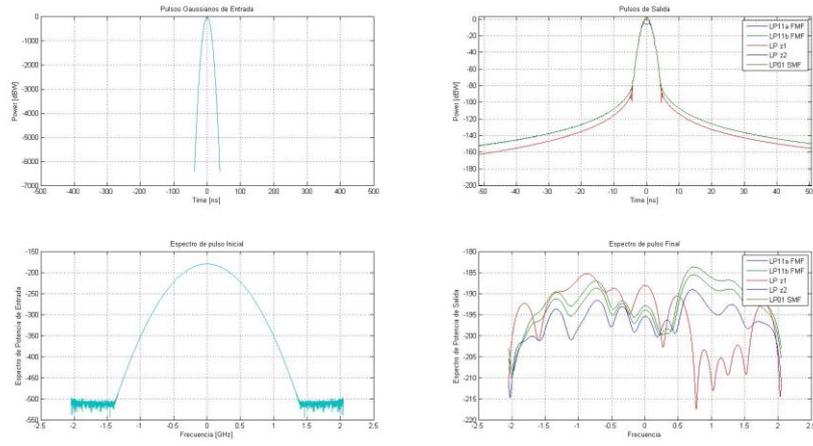
#### 5 km



#### 50 km

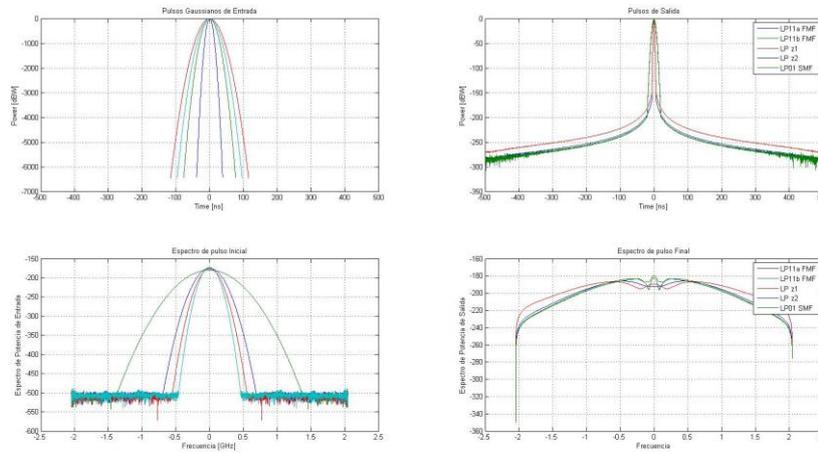


## 500 km

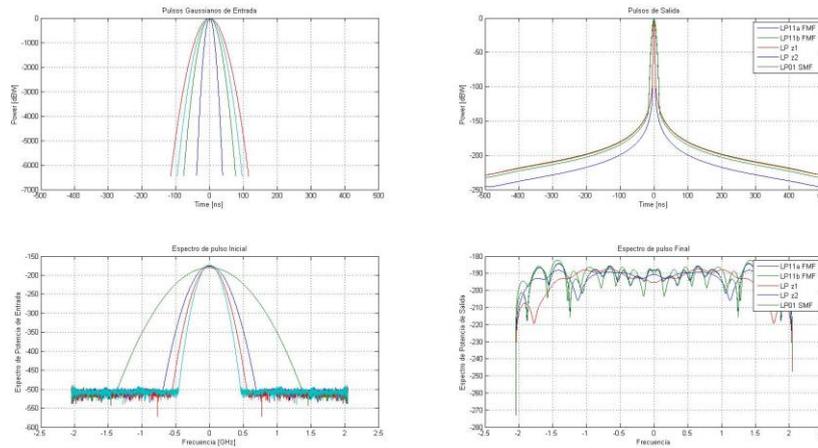


## Comparativa con diferentes pulsos de entrada

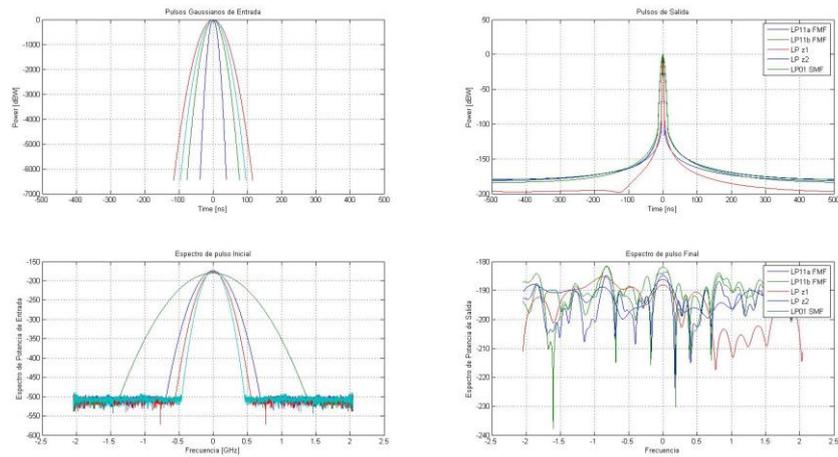
## 5 km



## 50 km



## 500 km



A la vista de las gráficas obtenidas para pulsos de entrada diferentes, se puede concluir que los resultados son satisfactorios, puesto que la distancia y el acoplo entre modos es directamente proporcional (como comentábamos anteriormente a nivel teórico).

Por otra parte, cuando los pulsos de entrada son idénticos, se ve claramente que dependiendo del modo afecta de forma muy diferente a sus compañeros. Esto se debe a los diversos coeficientes, lo que produce que el espectro se ensanche, tal y como esperaríamos por el efecto CIP/Kerr cruzado entre modos.

## 5. Conclusiones

Esta investigación surge como evolución natural al estudio de la implementación de fibras monomodo / pocos modos (monomode / FMF), extendido al caso de la multiplexación modal. Nuestra responsabilidad reside en extrapolar este punto de partida inicial, hasta implementar satisfactoriamente el caso que nos concierne.

La herramienta fundamental empleada en este trabajo se basa en las expresiones matemáticas de la Ecuación No Lineal de Schrödinger (NLSE), explicadas en el estado del arte.

El medio físico sobre el que se ha trabajado, consiste en una serie de rutinas de instrucciones en codificación de scripts, que implementan la NLSE mediante software Matlab. El código inicial sobre el que se ha trabajado es la rutina SSPROP de la Universidad de Maryland (USA), que soluciona dichas expresiones matemáticas.

Posteriormente este ha sido modificado, en base a los criterios comentados a lo largo de este trabajo, con vistas a implementar la multiplexación de nodos, siendo el resultado altamente satisfactorio.

Todo ello nos lleva a pensar en la gran utilidad que tiene esta técnica en los nuevos medios de comunicación ópticos, ante la creciente demanda de flujo de información por parte de los distintos usuarios.

A pesar de que para ello se requiere una mayor cantidad de carga computacional, debido al incremento de la dificultad en las operaciones matemáticas a calcular mediante el software.

Como líneas futuras se podría plantear la extrapolación a un todavía mayor número de modos, lo que resultaría en una sustancial mejora de los resultados, a costa de del consecuente incremento de dificultad de cálculo.

## 6. Bibliografía

- [1]  
- Materiales de la asignatura “Sistemas de Comunicación Ópticos” de la UOC
- [2]  
<http://www.antel.com.uy/personas-y-hogares/internet/fibra-optica/que-es-la-fibra-optica>
- [3]  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_%C3%B3ptica](https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica)
- [4]  
<http://redhfcseña.blogspot.com/2013/06/nodo-optico-nodos-opticos-es-donde-las.html>
- [5]  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n\\_por\\_divisi%C3%B3n\\_de\\_longitud\\_de\\_onda](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_longitud_de_onda)
- [6]  
<https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-luz#contenidos>
- [7]  
<https://fisica.laguia2000.com/general/refraccion-y-reflexion>
- [8]  
<https://www.fibraopticahoy.com/fibra-optica-que-es-y-como-funciona/>
- [9]  
<https://www.fibraopticahoy.com/fibra-optica-acoplada-multi-nucleo/>
- [10]  
<https://www.conectronica.com/fibra-optica/cables-de-fibra-optica/fibra-optica-multi-nucleo-para-interconexiones-opticas-con-la-mayor-densidad>
- [11]  
<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-22-4-3787&id=279381>
- [12]  
<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-18-12-13250&id=199966>
- [13]  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n#Multiplexaci%C3%B3n\\_en\\_telecomunicaciones](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n#Multiplexaci%C3%B3n_en_telecomunicaciones)
- [14]  
<http://yuricodelaotecomunicaciones.blogspot.com/2012/03/multiplexacion.html>
- [15]  
<https://www.slideshare.net/JosAntonioSandovalAc/fundamentos-de-telecomunicaciones-unidad-5-multiplexacin>
- [16]  
<https://sites.google.com/site/carlosraulsan2987/home/tecnologias-inalambricas/unidad-1/multiplexacion-fdm-tdm-y-cmd>
- [17]  
<http://ocw.uc3m.es/tecnologia-electronica/dispositivos-y-medios-de-transmision-opticos/material-de-clase-1/modulo-2-propagacion-en-fibras-opticas>
- [18]  
<http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/optica/89-EOSOMI-70-89.pdf>

# 7. Anexo – Códigos Matlab

## 7.1 Función SSPROP (original)

```
function u1 = ssprop(u0,dt,dz,nz,alpha,betap,gamma,maxiter,tol);

% This function solves the nonlinear Schrodinger equation for
% pulse propagation in an optical fiber using the split-step
% Fourier method.
%
% The following effects are included in the model: group velocity
% dispersion (GVD), higher order dispersion, loss, and self-phase
% modulation (gamma).
%
% USAGE
%
% u1 = ssprop(u0,dt,dz,nz,alpha,betap,gamma);
% u1 = ssprop(u0,dt,dz,nz,alpha,betap,gamma,maxiter);
% u1 = ssprop(u0,dt,dz,nz,alpha,betap,gamma,maxiter,tol);
%
% INPUT
%
% u0 - starting field amplitude (vector)
% dt - time step
% dz - propagation stepsize
% nz - number of steps to take, ie, ztotal = dz*nz
% alpha - power loss coefficient, ie, P=P0*exp(-alpha*z)
% betap - dispersion polynomial coefs, [beta_0 ... beta_m]
% gamma - nonlinearity coefficient
% maxiter - max number of iterations (default = 4)
% tol - convergence tolerance (default = 1e-5)
%
% OUTPUT
%
% u1 - field at the output
%
% NOTES The dimensions of the input and output quantities can
% be anything, as long as they are self consistent. E.g., if
% |u|^2 has dimensions of Watts and dz has dimensions of
% meters, then gamma should be specified in W^-1*m^-1.
% Similarly, if dt is given in picoseconds, and dz is given in
% meters, then beta(n) should have dimensions of ps^(n-1)/m.
%
% See also: sspropc (compiled MEX routine)
%
% AUTHOR: Thomas E. Murphy (tem@umd.edu)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Copyright 2006, Thomas E. Murphy
%
% This file is part of SSPROP.
%
% SSPROP is free software; you can redistribute it and/or
% modify it under the terms of the GNU General Public License
% as published by the Free Software Foundation; either version
% 2 of the License, or (at your option) any later version.
```

```

%
% SSPROP is distributed in the hope that it will be useful, but
% WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
% MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
% GNU General Public License for more details.
%
% You should have received a copy of the GNU General Public
% License along with SSPROP; if not, write to the Free Software
% Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA
% 02111-1307 USA

if (nargin<9)
    tol = 1e-5;
end
if (nargin<8)
    maxiter = 4;
end

nt = length(u0);
w = 2*pi*[0:nt/2-1,(-nt/2:-1)]/(dt*nt);

halfstep = -alpha/2;
for ii = 0:length(beta)-1;
    halfstep = halfstep - j*beta(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
end
halfstep = exp(halfstep*dz/2);

u1 = u0;
ufft = fft(u0);
for iz = 1:nz,
    uhalf = ifft(halfstep.*ufft);
    for ii = 1:maxiter,
        uv = uhalf .* exp(-j*gamma*(abs(u1).^2 + abs(u0).^2)*dz/2);
        uv = fft(uv);
        ufft = halfstep.*uv;
        uv = ifft(ufft);
        if (norm(uv-u1,2)/norm(u1,2) < tol)
            u1 = uv;
            break;
        else
            u1 = uv;
        end
    end
end
if (ii == maxiter)
    warning(sprintf('Failed to converge to %f in %d iterations',...
        tol,maxiter));
end
u0 = u1;
end

```

## 7.2 Función SSPROPV2 (modificado)

```

function [u1x,u1y,u1z1,u1z2] =
sspropv(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,psp,method,maxiter,tol);

% This function solves the coupled-mode nonlinear Schrodinger equations for
% pulse propagation in an optical fiber using the split-step
% Fourier method.
%
% The following effects are included in the model: group velocity

```

```

% dispersion (GVD), higher order dispersion, polarization
% dependent loss, arbitrary fiber birefringence, and
% self-phase modulation.
%
% USAGE
%
% [u1x,u1y] = sspropv(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma);
% [u1x,u1y] = sspropv(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,psp);
% [u1x,u1y] = sspropv(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,psp,method);
% [u1x,u1y] =
sspropv(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,psp,method,maxiter);
% [u1x,u1y] =
sspropv(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,psp,method,maxiter,tol);
%
%
% INPUT
%
% u0x, u0y      Starting field amplitude components
% dt           Time step
% dz           Propagation step size
% nz           Number of steps to take (i.e. L = dz*nz)
% alphaa, alphab Power loss coefficients for the two eigenstates
%              (see note (2) below)
% betapa, betapb Dispersion polynomial coefs, [beta_0 ... beta_m]
%              for the two eigenstates (see note (3) below)
% gamma        Nonlinearity coefficient
% psp          Polarization eigenstate (PSP) of fiber, see (4)
% method       Which method to use, either ???circular??? or ???elliptical???
%              (default = ???elliptical???, see instructions)
% maxiter      Max number of iterations per step (default = 4)
% tol          Convergence tolerance (default = 1e-5)
%
%
% OUTPUT
%
% u1x, u1y     Output field amplitudes
%
%
% NOTES
%
% (1) The dimensions of the input and output quantities can
% be anything, as long as they are self consistent. E.g., if
%  $|u|^2$  has dimensions of Watts and dz has dimensions of
% meters, then gamma should be specified in  $W^{-1}m^{-1}$ .
% Similarly, if dt is given in picoseconds, and dz is given in
% meters, then beta(n) should have dimensions of  $ps^{(n-1)}/m$ .
%
% (2) The loss coefficients (alpha) may optionally be specified
% as a vector of the same length as u0, in which case it is
% treated as vector that describes alpha(w) in the frequency
% domain. (The function wspace.m in the tools subdirectory can
% be used to construct a vector with the corresponding
% angular frequencies.)
%
% (3) The propagation constant beta(w) can also be specified
% directly by replacing the polynomial argument betap with a
% vector of the same length as u0. In this case, the argument
% betap is treated as a vector describing propagation in the
% frequency domain.
%

```

```

% (4) psp describes the polarization eigenstates of the fiber. If
% psp is a scalar, it gives the orientation of the linear
% birefringence axes relative to the x-y axes. If psp is a
% vector of length 2, i.e., psp = [psi,chi], it describes the
% describes the ellipse orientation and ellipticity of the
% first polarization eigenstate. Specifically, (2*psi,2*chi)
% are the% longitude and latitude of the principal eigenstate
% on the Poincare sphere.
%
%
% AUTHORS: Afrouz Azari (afrouz@umd.edu)
%         Ross A. Pleban (rapleban@ncsu.edu)
%         Reza Salem (rsalem@umd.edu)
%         Thomas E. Murphy (tem@umd.edu)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Copyright 2006, Thomas E. Murphy
%
% This file is part of SSPROP.
%
% SSPROP is free software; you can redistribute it and/or
% modify it under the terms of the GNU General Public License
% as published by the Free Software Foundation; either version
% 2 of the License, or (at your option) any later version.
%
% SSPROP is distributed in the hope that it will be useful, but
% WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
% MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
% GNU General Public License for more details.
%
% You should have received a copy of the GNU General Public
% License along with SSPROP; if not, write to the Free Software
% Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA
% 02111-1307 USA

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

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% MODIFICACION: tomamos del vector las variables de interes

% PARES DE MODOS NUEVOS:

u0z1=u0x(:,2); % segunda columna (modo nuevo)
u0z2=u0y(:,2); % segunda columna (modo nuevo)

% PAR DE MODO ORIGINAL:

u0x=u0x(:,1); % primera columna (variable original)
u0y=u0y(:,1); % primera columna (variable original)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

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

```

```

    hb = hb - j*betapb(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
end
end

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

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

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% First, rotate coordinates to circular basis:
% Hace una translaci?n para interpretar el vector de componentes que le entramos. Se supone
que le entramos un vector de Jones.
u0a = transpose((1/sqrt(2)).*(u0x + j*u0y));
u0b = transpose((1/sqrt(2)).*(j*u0x + u0y));

% MODIFICACION: An?logo a nuevos pares de modos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
u0c = transpose((1/sqrt(2)).*(u0z1 + j*u0z2));
u0d = transpose((1/sqrt(2)).*(j*u0z1 + u0z2));

% Propagation matrix for linear calcuations
% A partir de los ?ngulos de entrada, se construye la matriz a tener en cuenta para rotar las
componentes de cara a los c?lculos de la parte lineal
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;

% Aqu? se inicializan las variables antes de entre en el bucle
u1a = u0a;
u1b = u0b;
uafft = fft(u0a);
ubfft = fft(u0b);

% MODIFICACION: An?logo a nuevos pares de modos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
u1c = u0c;
u1d = u0d;
ucfft = fft(u0c);
udfft = fft(u0d)

tinit=tic;

% Entramos en el bucle para los pasos de distancia
for iz = 1:nz,
% Calculate 1st linear half
% Se calcula la primera mitad de la parte lineal de la ecuaci?n
uahalf = ifft( h11.*uafft + h12.*ubfft );
ubhalf = ifft( h21.*uafft + h22.*ubfft );

% MODIFICACION: An?logo a nuevos pares de modos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
uchalf = ifft( h11.*ucfft + h12.*udfft );
udhalf = ifft( h21.*ucfft + h22.*udfft );

```

% Entramos en el bucle para el cálculo de la no-linealidad y la segunda mitad de la parte lineal de la ecuación. Así aseguramos que converge con cierta tolerancia (que se ha definido al llamar la función)

for ii = 1:maxiter,

% Calculate nonlinear section

% Parámetros para LP11a -> acoplo con los otros modos

faaaa=1.0573; % LP11

faabb=0.35; % LP11a / LP11b

faacc=0; % LP11a / LP21a

faadd=0; % LP11a / LP21b

% Parámetros para LP11b -> acoplo con los otros modos

fbbbb=1.0573; % LP11

fbbba=0.35; % LP11b / LP11a

fbbcc=0; % LP11b / LP21a

fbbdd=0; % LP11b / LP21b

% Parámetros para LP21a -> acoplo con los otros modos

fcccc=0.9410; % LP21

fccaa=0; % LP21a / LP11a

fccbb=0; % LP21a / LP11b

fccdd=0.92; % LP21a / LP21b

% Parámetros para LP21b -> acoplo con los otros modos

fdddd=0.9410; % LP21

fddaa=0; % LP21b / LP11a

fddbb=0; % LP21b / LP11b

fddcc=0.92; % LP21b / LP21a

% Se calcula la no-linealidad teniendo en cuenta el acoplo entre modos

```
uva = uahalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz).* ...
    ( (8*faaaa/3)*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 + ...
      4*faabb*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 +...
      4*faacc*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 +...
      4*faadd*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 ) );
```

uva = fft(uva);

```
uvb = ubhalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz).* ...
    ( (8*fbbbb/3)*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 + ...
      4*fbbba*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 +...
      4*fbbcc*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 +...
      4*fbbdd*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 ) );
```

uvb = fft(uvb);

% MODIFICACION: Analogó a nuevos pares de modos

%%%

```
uvc = ubhalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz).* ...
    ( (8*fcccc/3)*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 + ...
      4*fccaa*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 +...
      4*fccbb*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 +...
      4*fbbdd*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 ) );
```

uvc = fft(uvc);

```
uvd = ubhalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz).* ...
    ( (8*fdddd/3)*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 + ...
      4*fddaa*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 +...
      4*fddbb*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 +...
      4*fddcc*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 +...
      4*fdddd*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 ) );
```

```

4*fdcc*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 );
uvd = fft(uvd);

% Calculate 2nd linear half
% Se calcula la segunda mitad de la parte lineal de la ecuaci?n
uafft = h11.*uva + h12.*uvb;
ubfft = h21.*uva + h22.*uvb;
uva = ifft(uafft);
uvb = ifft(ubfft);

% MODIFICACION: An?logo a nuevos pares de modos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ucfft = h11.*uvc + h12.*uvd;
udfft = h21.*uvc + h22.*uvd;
uvc = ifft(ucfft);
uvd = ifft(udfft);

% MODIFICACION: Incluimos condicion nueva en el if %%%%%%%%%%%
% Se mira si se cumple el criterio de convergencia
if (( ( sqrt(norm(uva-u1a,2).^2+norm(uvb-u1b,2).^2) / ...
      sqrt(norm(u1a,2).^2+norm(u1b,2).^2) ) < tol ) || ( ( sqrt(norm(uvc-u1c,2).^2+norm(uvd-
u1d,2).^2) / ...
      sqrt(norm(u1c,2).^2+norm(u1d,2).^2) ) < tol ))
% tolerances met, break loop
% En caso de que cumpla, se sale del bucle
u1a = uva;
u1b = uvb;
u1c = uvc;
u1d = uvd;
break;
else
% tolerances not met, repeat loop
% Si no, se vuelve a repetir el c?lculo
u1a = uva;
u1b = uvb;
u1c = uvc;
u1d = uvd;
end
end %end convergence iteration

% Si se llega al m?ximo de iteraciones sin cumplir el criterio de convergencia, lanza un
mensaje de aviso
if (ii == maxiter)
warning(sprintf('Failed to converge to %f in %d iterations',...
tol,maxiter));
end
u0a = u1a;
u0b = u1b;
% MODIFICACION: An?logo a nuevos pares de modos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
u0c = u1c;
u0d = u1d;

% Cada t>10 segundos lanza un mensaje indicando el progreso del script

if(toc(tinit)>10)

```

```

    strout=sprintf('Propagating through fiber: %2f complete.', 100*iz/nz);
    disp(strout);
    tinit=tic;
end
end %end step iteration

% Una vez acabado todo, rota de nuevo las componentes para devolverlas
% Rotate back to x-y basis:
u1x = (1/sqrt(2)).*(u1a-j*u1b) ;
u1y = (1/sqrt(2)).*(-j*u1a+u1b) ;

% MODIFICACION: An?logo a nuevos pares de modos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
u1z1 = (1/sqrt(2)).*(u1c-j*u1d) ;
u1z2 = (1/sqrt(2)).*(-j*u1c+u1d) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

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(u1a).^2)/2 + ...
              (2+2*sin(2*chi)^2)*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 ) );
        uvb = ubhalf .* exp( (-j*(1/3)*gamma*dz).* ...
            ( (2 + cos(2*chi)^2)*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 + ...
              (2+2*sin(2*chi)^2)*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^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-u1a,2).^2+norm(uvb-u1b,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

% Convert back from elliptical basis to linear basis:

u1x = ( cos(psi)*cos(chi) + j*sin(psi)*sin(chi))*u1a + ...
    (-sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*u1b;
u1y = ( sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*u1a + ...
    ( cos(psi)*cos(chi) - j*sin(psi)*sin(chi))*u1b;
% MODIFICACION: An?logo a nuevos pares de modos
%%%%%%%%%%%%%%
u1z1 = ( cos(psi)*cos(chi) + j*sin(psi)*sin(chi))*u1c + ...
    (-sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*u1d;
u1z2 = ( sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*u1c + ...
    ( cos(psi)*cos(chi) - j*sin(psi)*sin(chi))*u1d;

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

```

### 7.3 Código (main) principal de simulación

```

%Programa para simulación de fibra optica
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 = 500e3;           % distancia total [m]
nz = 1e3;           % numero de pasos
dz = z/nz;         % tamaño del paso "stepsize"
gamma = 0.0014;     % coeficiente de no linealidad [W-1.m-1]

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

Po1=1; %Amplitud del pulso gaussiano 1
t0x=1e-09; %Anchura del pulso 1er entrada
u0x=Po1*exp(-t.^2/(2*(t0x^2))); %pulso gaussiano 1

```

```

Po2=0.8; %Amplitud del pulso gaussiano 2
t0y=3e-09; %Anchura del pulso 2da entrada
u0y=Po2*exp(-t.^2/(2*(t0y^2))); %pulso gaussiano 2

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% CORRECCION: Introducimos mas pulsos gaussianos

Po3=0.9; %Amplitud del pulso gaussiano 3
t0z1=2e-09; %Anchura del pulso
u0z1=Po3*exp(-t.^2/(2*(t0z1^2))); %pulso gaussiano 3

Po4=0.6; %Amplitud del pulso gaussiano 4
t0z2=2.5e-09; %Anchura del pulso
u0z2=Po4*exp(-t.^2/(2*(t0z2^2))); %pulso gaussiano 4

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% CORRECCION: Probamos a copiar los pulsos, para analizar el acoplo

u0y=u0x;
u0z1=u0x;
u0z2=u0x;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Transformación de campo eléctrico a campo óptico

% Modulación de salida óptica

% 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 = 0.7*1e-3; %[dB/m] Atenuación en dB de la F.O.
alphadB = 0
alpha = alphadB/(10*log10(exp(1)));
%a=zeros(1,nt);
%for i=0:length(a)-1;
% a(1,i+1)=alpha;
%end
%a(1,:)=alpha;
alphaa = alphadB/(10*log10(exp(1))); % Atenuación lineal F.O. Estado de Polarización
alphab = alphadB/(10*log10(exp(1))); % Atenuación lineal F.O.
%alphaa=a;
%alphab=a;
D = 27.3e-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
[u1xm]=ssprop(u0x, dt, dz, nz, alphaa, betapa, gamma)
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% MODIFICACION: vector de pares de modos para la llamada a sspropv2
% (metemos los valores de los nuevos pares en vectores, sobrescribiendo las variables
originales para no afectar a la llamada de sspropv2)
```

```
u0x=[u0x u0z1];
u0y=[u0y u0z2];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Calculo de la propagación a través de la FMF
[u1x,u1y,u1z1,u1z2] =
sspropv2(u0x,u0y,dt,dz,nz,alphaa,alphab,betapa,betapb,gamma,0,'circular');
```

```
% Gráfica de señales del sistema
subplot(221);
plot(t/1e-9,20*log10(abs(u0x)),t/1e-9,20*log10(abs(u0y)));
%xlim([-3e-08,3e-08]);
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(u1x)),t/1e-9,20*log10(abs(u1y)), t/1e-9, 20*log10(abs(u1xm)));
```

```
% MODIFICACION: representar nuevos modos
hold on;
plot(t/1e-9,20*log10(abs(u1z1)),t/1e-9,20*log10(abs(u1z2)));
```

```
%xlim([-3e-08,3e-08]);
grid on;
xlabel ('Time [ns]');
ylabel ('Power [dBW]');
title ('Pulsos de Salida');
legend('LP11a FMF', 'LP11b FMF', 'LP z1', 'LP z2', 'LP01 SMF');
```

```
subplot(223); %gráfica espectros de entrada
U0X = fftshift(abs(dt*fft(u0x)/sqrt(2*pi)).^2); % input power spectrum u0X
U0Y = fftshift(abs(dt*fft(u0y)/sqrt(2*pi)).^2); % input power spectrum u0y
plot (vs/1e9,10*log10(U0X),vs/1e9,10*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(u1x)/sqrt(2*pi)).^2); % output power spectrum u1x
U1XM = fftshift(abs(dt*fft(u1xm)/sqrt(2*pi)).^2); % output power spectrum u1xm
U1Y = fftshift(abs(dt*fft(u1y)/sqrt(2*pi)).^2); % output power spectrum u1y
plot(vs/1e9,10*log10(U1X),vs/1e9,10*log10(U1Y), vs/1e9, 10*log10(U1XM));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODIFICACION:
U1Z1 = fftshift(abs(dt*fft(u1z1)/sqrt(2*pi)).^2); % output power spectrum u1z1
U1Z2 = fftshift(abs(dt*fft(u1z2)/sqrt(2*pi)).^2); % output power spectrum u1z2
hold on;
plot(vs/1e9,10*log10(U1Z1),vs/1e9,10*log10(U1Z2));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

grid on;
xlabel ('Frecuencia');
ylabel ('Espectro de Potencia de Salida');
title ('Espectro de pulso Final');
legend('LP11a FMF', 'LP11b FMF', 'LP z1', 'LP z2', 'LP01 SMF');

```